



皇甫川流域不同植被类型植物群落特征与土壤抗蚀性关系的研究

曲明明, 史秀红, 冯超

引用本文:

曲明明, 史秀红, 冯超. 皇甫川流域不同植被类型植物群落特征与土壤抗蚀性关系的研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2026, 34(3): 265–277.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.5008>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

金马河温江段河岸带不同生境植物物种多样性与土壤理化性质的动态变化

Dynamic Changes in Plant Diversity and Soil Physical and Chemical Properties in Different Habitats in Wenjiang Section of Jinma River

热带亚热带植物学报. 2021, 29(1): 1–8 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4237>

人为干扰对栲树次生林群落物种多样性和土壤理化性质的影响

Effect of Human Disturbance on Species Diversity and Soil Physiochemical Properties of Castanopsis fargesii Secondary Forest

热带亚热带植物学报. 2018, 26(4): 355–362 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3843>

地被植物对广东常绿阔叶林土壤养分的指示作用

Indicative Effect of Ground Vegetation on Soil Nutrient Status in Evergreen Broad-leaved Forest of Guangdong

热带亚热带植物学报. 2020, 28(2): 115–123 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4105>

5种相思树和尾巨桉人工林土壤养分和酶活性特征

Characteristics of Soil Nutrient and Enzyme Activities in Plantations of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* and Five *Acacia* Species

热带亚热带植物学报. 2021, 29(5): 483–493 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4334>

草海国家级自然保护区华山松群落特征及物种多样性研究

热带亚热带植物学报. 2020, 28(1): 44–52 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4063>

向下翻页，浏览PDF全文

皇甫川流域不同植被类型植物群落特征与土壤抗蚀性关系的研究

曲明明, 史秀红, 冯超*

(内蒙古农业大学草业学院, 呼和浩特 010011)

摘要: 为探究皇甫川流域不同植被类型下植物群落特征和土壤抗蚀性能, 该文以皇甫川流域的 20 a 人工油松林、20 a 人工松杨混合林、40 a 人工油松林、40 a 人工杨树林、人工柠条灌木林、退化草地、裸地为研究对象, 调查苔藓和草本植物的群落特征, 选取 13 个土壤抗蚀性指标, 采用主成分分析法综合评价土壤抗蚀性。结果表明, 40 a 人工油松林下苔藓植物的 α 多样性最高; 草本植物在 40 a 人工杨树林下物种丰富度、均匀度最大。人工乔木林、人工柠条灌木林和退化草地的地表糙度、饱和导水率、土壤有机质含量、全碳全氮含量、紧实度高于裸地, 平均重量直径、pH、可蚀性 K 因子低于裸地; 粒径均主要集中在 10~250 μm ; 人工乔木林的土壤黏结力高于裸地。主成分分析结果表明土壤全氮、土壤全碳、有机质、粉粒含量、地表糙度是评价土壤抗蚀性的重要指标; 40 a 人工油松林综合土壤抗蚀性最高, 人工柠条灌木林土壤抗蚀性最低。

关键词: 皇甫川流域; 植物群落; 土壤抗蚀性; 植被类型

doi: 10.11926/jtsb.5008 CSTR: 32235.14.jtsb.5008

Relationship Between Plant Community Characteristics of Different Vegetation Types and Soil Erosion Resistance in Huangfuchuan Basin

QU Mingming, SHI Xiuhong, FENG Chao*

(College of Prataculture, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010011, China)

Abstract: To explore the characteristics of plant communities and soil erosion resistance under different vegetation types in the Huangfu Basin, the community characteristics of mosses and herbaceous plants of different vegetation types in the Huangfu Basin were investigated, including 20-year artificial oil pine forest, 20-year artificial pine and poplar mixed forest, 40-year artificial oil pine forest, 40-year artificial poplar forest, artificial caragana shrub forest, degraded grassland and bare land. The soil erosion resistance from 13 indicators was comprehensively evaluated by using principal component analysis. The results showed that the α diversity of mosses was the highest under 40-year artificial oil pine forest; the species richness and evenness of herbaceous plants were the greatest under 40-year artificial poplar forest. The surface roughness, saturated hydraulic conductivity, soil organic matter content, total carbon and total nitrogen content, and bulk density of artificial tree forest, artificial caragana shrub forest and degraded grassland were higher than those of bare land, while the average weight diameter, pH and erodibility K factor were lower than those of bare land; the particle size was mainly concentrated in 10–250 μm ; the soil cohesion of artificial tree forests was higher than that of bare land. The principal component analysis indicated that soil total nitrogen, soil total carbon, organic matter, silt content and surface roughness were important indicators for evaluating soil erosion resistance; the comprehensive soil

收稿日期: 2025-01-24 接受日期: 2025-06-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(32060051, 32460052); 内蒙古重点研发和成果转化计划(科技支撑东北振兴)项目(2023YFDZ0016)资助

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 32060051, 32460052), and the Key Project for Research, Development and Transformation of Inner Mongolia (Science and Technology Support for Northeast Revitalization) (Grant No. 2023YFDZ0016).

作者简介: 曲明明(2000 年生), 女, 硕士研究生, 研究方向为植物生态学。E-mail: 15048288786@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hujiaof@sina.com

erosion resistance of 40-year artificial oil pine forest was the highest, and that of artificial caragana shrub forest was the lowest.

Key words: Huangfuchuan Basin; Plant community; Soil corrosion resistance; Vegetation type

土壤侵蚀是人类和自然共同作用导致的土壤退化现象, 严重威胁生产生活和生态环境^[1]。黄土高原是我国土壤侵蚀最严重的地区之一^[2], 复杂地理条件致水土流失与土壤侵蚀加剧, 皇甫川流域是该地区侵蚀严重、生态脆弱的典型代表^[3]。土壤抗蚀性是土壤抵抗外营力分散和悬浮的能力, 受土壤理化性质及外在环境因素综合影响, 是评估土壤抗蚀能力的重要指标^[4]。土壤理化性质是土壤最基本的性质, 直接决定了土壤抗蚀性的强弱。研究表明, 通过对土壤物理性质与土壤抗蚀性的相关性分析, 土壤机械组成是影响土壤抗蚀性的关键物理性质^[5]。土地利用方式对土壤抗蚀性影响显著, 不同植被覆盖类型和土地利用方式的土壤抗蚀性存在差异。在黄土高原地区, 5 种典型土地利用方式对土壤抗蚀性的影响以灌丛最强, 其次是林地、草地、果园和农田^[6]; 而在藏中半干旱地区, 人工林地抗蚀性最强, 其次是农耕地、撂荒地和灌丛地^[7]。此外, 地形因素如坡度也会对土壤抗蚀性产生影响^[8]。主成分分析 (principal component analysis, PCA) 是评价土壤抗蚀性的一种方法^[9]。Wu 等^[10]在研究植被冠层和根系的季节变化及其对土壤抗蚀性的响应时, 采用主成分分析结合隶属函数法计算土壤可蚀性综合指数。张军等^[11]通过主成分分析, 认为水稳性团聚体含量、有机质、抗蚀指数、团聚状况、团聚度、湿筛平均重量直径是不同龄级马尾松林的最适抗蚀性指标。这表明 PCA 可以用于识别关键的土壤抗蚀性指标, 为土壤抗蚀性研究提供科学依据。基于此, 植被恢复与重建被视为水土流失严重地区的生态治理根本措施, 可提升土壤抗蚀性, 改善生态环境。目前, 皇甫川流域在水土流失规律^[12-13]、流域治理等^[14-15]方面研究较多, 但土壤抗蚀性评价研究较少。

本研究旨在揭示不同植被类型提升土壤抗蚀性能的机理, 并评价其水土保持效益。通过分析皇甫川流域典型植被 20 a 人工油松林、20 a 人工松杨混合林、40 a 人工油松林、40 a 人工杨树林、人工柠条灌木林、退化草地、裸地下植物群落特征及土壤理化性质、力学特征和团粒结构等指标, 为该地

区土壤抗蚀性研究和生态治理提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

皇甫川发源于鄂尔多斯高原与黄土高原的过渡地带, 位于晋陕蒙交界处, 属于水蚀风蚀过渡区, 也是典型的黄土丘陵沟壑区。皇甫川是黄河中游的一级支流, 是半干旱区典型的季节性河流。在气候上属典型温带半干旱气候, 年均温度为 6.2 °C, 年均降水量为 369 mm, 6 月—9 月降水量占 80%。皇甫川流域的原生植被为片状分布的灌木草原和暖温带典型草原——本氏针茅 (*Stipa bungeana*) 草原。目前主要人工植被有油松 (*Pinus tabulaeformis*) 林、侧柏 (*Platycladus orientalis*) 林、杨树 (*Populus simonii*) 林和中间锦鸡儿 (*Caragana intermedia*) 灌木林等; 地带性天然植被有本氏针茅和百里香 (*Thymus serpyllum*) 草原等。

1.2 样地选择

试验地点位于皇甫川流域的五分地沟和阳泉沟, 五分地沟 (111°07' E, 39°45' N) 试验区位于皇甫川流域中游东岸, 是具备皇甫川典型自然地理特征的小流域之一, 可作为皇甫川流域植被生长和土地利用现状的代表^[16]。与五分地沟相对的阳泉沟 (111°06' E, 39°45' N) 则位于长川中游西岸宁格儿塔, 两者成土条件及地形地貌相似^[17], 主体地貌是丘陵沟壑, 错综复杂。该地土壤主要包括砒砂岩母质的栗钙土、风沙土, 以及黄土母质的黄绵土和黄土。为比较不同水土治理措施下的抗蚀性差异, 选择了人工杨树林、人工油松林、人工杨松混合林、人工柠条灌木林、次生草地和裸地为研究样地 (表 1)。2023 年 7 月, 在研究地进行群落特征调查和样品采集。根据植被类型、恢复年限选择 7 种植被类型, 在坡向和土壤一致、坡度相似的区域设置样地 (10 m×10 m), 每种植被类型设置 3 个样地, 共 21 个样地。每个样地设置 3 个大样方 (2 m×2 m), 共 63 个大样方。

1.3 样品采集

群落特征调查过程中, 记录草本植物物种名、

表 1 样地信息

Table 1 Sample plot information

地点 Location	植被类型 Vegetation type	样地 Plot	经纬度 Longitude and latitude	海拔 Altitude (m)	树高 (m) Tree height	胸径/冠幅 (cm) DBH/Crown width	行间距 (m) Line space
阳泉沟 Yangquangou	20 a 人工油松林 20-years artificial pine forest	QS	111°6'31.94" E 39°45'43.91" N	1 077.6	4.87	10.01	4.52×1.67
	20 a 人工松杨混合林 20-year mixed pine and poplar plantation	QSY	111°6'32.26" E 39°45'44.76" N	1 075.9	5.73	11.16	3.76×1.77
	人工柠条灌木林 Artificial lemon shrub forest	QN	111°6'52.26" E 39°45'56.19" N	1 160.5	1.51		184.00×182.67
	裸地 Bare land	QL	111°6'32.54" E 39°45'44.71" N	1 078.8			
	40 a 人工油松林 40-year plantation pine forest	WS	111°7'40.01" E 39°45'27.98" N	1 093.2	6.81	12.09	2.30×2.64
五分地沟 Wufendigou	40 a 人工杨树林 40-year poplar plantation	WY	111°7'39.97" E 39°45'27.55" N	1 100.5	6.16	11.78	2.08×2.83
	退化草地 Degraded grassland	WC	111°7'48.00" E 39°45'32.83" N	1 077.6			

高度、密度、盖度；在各大样方内沿 S 形分别测定 20 次土壤紧实度与黏结力，随机选取 3 个点用 100 cm² 环刀取样用于测定饱和导水率。按照五点采样法采集 0~5 cm 土壤，5 份土壤样品混匀后装入塑料盒后带回室内。经自然风干后，挑出明显的根、茎、叶、虫体等动植物残渣和石块。采用四分法保留 200 g 原状土用于土壤团聚体测定，其余土样用木棒碾碎后过 2 mm 土壤筛。

1.4 指标测定

1.4.1 土壤基本理化性质测定

地表糙度测定选用链条法^[18]；饱和导水率采用环刀法^[19]；土壤机械组成使用激光粒度仪测定^[20]；团聚体稳定性采用湿筛法^[21]；土壤黏结力和紧实度分别用土壤剪力测量仪^[17]、土壤紧实度仪^[22]测定；土壤 pH 采用电位法测定^[25]；土壤有机质含量采用重铬酸钾-浓硫酸外加加热法测定^[23]；土壤全碳、全氮含量采用有机元素分析仪测定。

1.4.2 物种多样性计算

α 多样性是对某个种群或生境中物种多样性的一种度量，本研究采用 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数、Simpson 指数来分析人工接种生物结皮后地上植物的多样性^[24]。

重要值(IV)=(相对密度+相对高度+相对盖度)/3，Simpson 指数 $D=1-\sum(N_i/N)^2$ ，Shannon-Wiener

指数 $H'=-\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$ ，Pielou 均匀度指数 $J_p=H'/\ln S$ ，

式中， S 为物种数目， N_i 为第 i 种的个体数， N 为所有物种的个体总数， P_i 为第 i 种的相对多度， $P_i=$

N_i/N 。

1.4.3 土壤可蚀性 K 因子

采用 EPIC 模型计算 K 因子^[17]， $K_{epic}=$

$\{0.2 - 0.3 \exp[-0.0256 Sa(1 - Si/100)]\}$

$\left(\frac{Si}{Ci + Si}\right)^{0.3} \left[1.0 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)}\right] \times$

$\left\{1.0 - \frac{0.7\left(1 - \frac{Sa}{100}\right)}{\left(1 - \frac{Sa}{100}\right) + \exp\left[-5.51 + 22.9\left(1 - \frac{Sa}{100}\right)\right]}\right\}$ ，式

中， K_{epic} 是利用 EPIC 模型计算得到的土壤可蚀性因子，单位为 t·h/(MJ·mm)； Sa 、 Si 、 Cl 、 C 分别为土壤砂粒、粉粒、黏粒、有机碳含量(%)。

Zhang 等^[25]根据黄土高原实际情况，提出黄土高原土壤可蚀性 K 因子的修正公式： $K=-0.01383+0.5158K_{epic}$ 。

1.4.4 土壤机械组成

土壤中的颗粒按其直径大小划分为不同的粒级。本研究根据国际制和中国制将粒径分为 7 类，分别是<2 μm (黏粒)、2~5 μm (细粉粒)、5~10 μm (中粉粒)、10~100 μm (粗粉粒)、100~250 μm (细砂粒)、250~500 μm (中砂粒)和 500~2 000 μm (粗砂粒)^[26]。

1.5 数据的统计分析

采用 IBM SPSS Statistics 26 进行单因素方差分析(One-Way ANOVA)、Duncan 多重比较检验法进行分析，采用 Origin 2024 进行绘图。

2 结果和分析

2.1 植物 α 多样性指数

7 种植被类型样地中, QL 为裸地, 除 QN 外, 其他 5 种植被类型均有苔藓植物分布; QS、QSY、QN、WS、WY、WC 样地中均有草本植物分布(表 2)。WS 植被类型下苔藓植物的 Simpson、Shannon-Weiner、Pielou 指数最大, 表明该植被类型物种多样性最高、丰富度最大、物种分布最均匀; WC 植被类型下苔藓植物的 Simpson、Shannon-Weiner、Pielou 指数最小。WY 植被类型下草本植物的 Simpson、Shannon-Weiner、Pielou 指数最大; WS 植被类型下草本植物的 Simpson、Shannon-Weiner、Pielou 指数最小。

2.2 不同植被类型的土壤物理性质

地表糙度通过影响径流流速、地表水入渗率等影响土壤抗蚀性。糙度指数平均值为 2.80~9.53 (图 1), 其中 QL 最低, WS 最高, 存在显著差异($P<0.05$)。QS、QSY、WS、WY、WC 糙度指数均显著高于 QL, 分别增加 137.74%、138.95%、240.70%、162.51%、93.08%。不同植被类型土壤黏结力平均值为 1.18~2.65 kPa, QN 土壤黏结力最小, QS 最大,

与 QL 相比, QS、QSY、WS、WY 的土壤黏结力分别显著增加了 26.71%、13.55%、23.72%、20.75%, QN、WC 分别显著减少了 43.71%、0.86%, 表明人工柠条灌木林和退化草地与裸地相比土壤黏结力下降, 人工乔木林可以提高土壤黏结力, 20 a 人工油松林土壤黏结力最高。不同植被类型土壤饱和和导水率为 0.34~1.23 mm/min, QS、QSY、QN、WS、WY、WC 的土壤饱和和导水率均显著高于 QL ($P<0.05$), 增幅分别为 239.48%、150.92%、266.05%、189.67%、138.80%、116.48%, 大小依次为 QN>QS>WS>QSY>WY>WC>QL。表明人工柠条灌木林的土壤饱和和导水率高于人工乔木林, 其中 QN 的土壤饱和和导水率显著高于 QSY 和 WY; 人工乔木林的土壤饱和和导水率高于退化草地。不同植被类型下的平均重量直径为 0.16~0.35 mm, 其中, QL 的最大, 显著高于 QN、WY、WC, 依次为 QL>QSY>QS>WS>QN>WY>WC。表明植被覆盖会显著降低 0~5 cm 土层的平均重量直径。

结果表明, 有植被覆盖的地表糙度、土壤饱和和导水率显著高于裸地; 人工柠条灌木林和退化草地会降低土壤黏结力, 20 a 人工油松林显著提高土壤黏结力; 不同植被类型的平均重量直径均比裸地低。

表 2 苔藓植物与草本植物的 α 多样性指数

Table 2 α -diversity index of bryophytes and herbaceous plants

植被类型 Vegetation type	地上植被 Epiphyte	Simpson 指数 Simpson index	Shannon-Weiner 指数 Shannon-Weiner Index	Pielou 指数 Pielou Index
QS	苔藓植物 Bryophyte	0.403	0.593	0.855
	草本植物 Herb	0.691	1.384	0.860
QSY	苔藓植物 Bryophyte	0.428	0.619	0.893
	草本植物 Herb	0.768	1.537	0.955
QN	草本植物 Herb	0.757	1.564	0.873
WS	苔藓植物 Bryophyte	0.509	1.009	0.919
	草本植物 Herb	0.535	0.886	0.806
WY	苔藓植物 Bryophyte	0.491	0.831	0.757
	草本植物 Herb	0.876	2.135	0.971
WC	苔藓植物 Bryophyte	0.299	0.476	0.687
	草本植物 Herb	0.662	1.699	0.948

QS、QSY、QN、WS、WY、WC 见表 1。下同

QS, QSY, QN, WS, WY and WC see Table 1. The same below

从表 3 可见, 地表处的土壤紧实度平均值为 300.37~457.25 kPa, 其中 QL 最大, WY 最小。QS、QSY、QN、WS、WY、WC 与 QL 相比分别显著减少 20.04%、26.48%、21.57%、11.10%、34.31%、15.89% ($P<0.05$)。QL 显著高于 QSY、QN、WY ($P<$

0.05), 但与 QS、WS、WC 间的差异不显著。在垂直方向上不同植被类型的土壤紧实度均呈现递增趋势, 即随着土层深度的增加土壤紧实度逐渐增大, 其中 QS、QSY、QN、QL、WS、WY 的土壤紧实度均随着土层深度的增加而显著增加($P<0.05$),

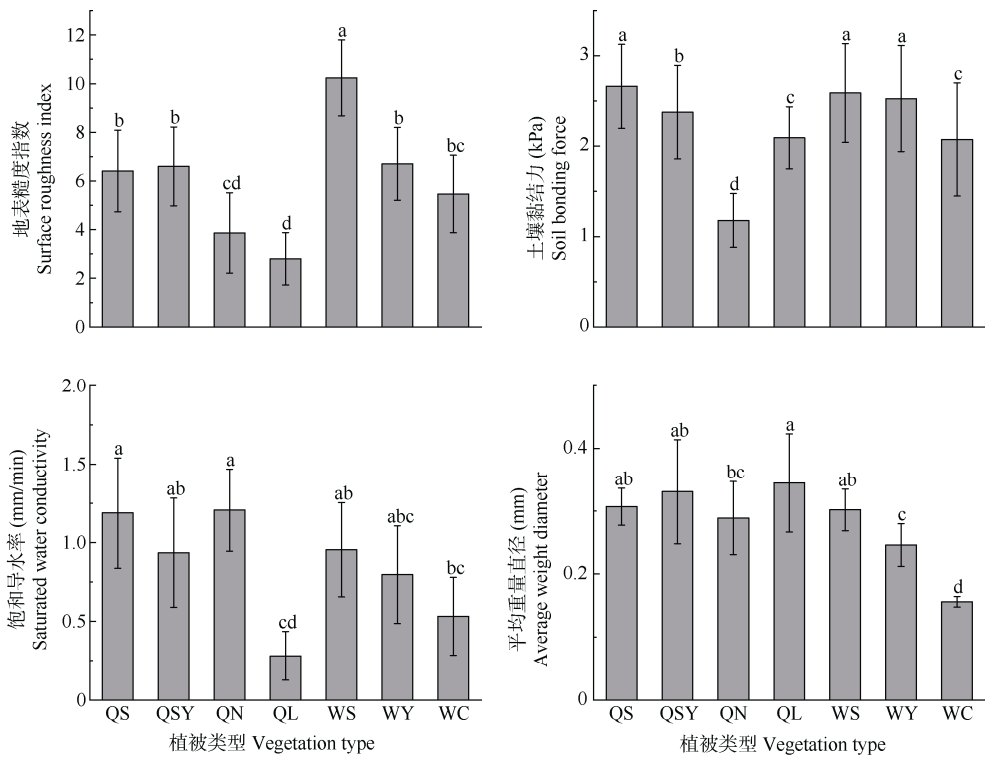


图 1 不同植被类型的土壤物理性质。柱上不同字母表示差异显著($P<0.05$)。下同

Fig. 1 Changes in soil physical properties of different vegetation types. Different letters upon column indicate significant differences at 0.05 level. The same below

WC 的土壤紧实度在垂直方向上增加不显著。因此, 植被覆盖可以显著降低 0~10 cm 土层的土壤紧实度, 40 a 人工杨树林的降低效果最好, 其次为人工柠条灌木林、20 a 人工松杨混合林, 退化草地效果最差。

由表 4 可见, 不同植被类型下, 土壤粒径 $<2\text{ }\mu\text{m}$ 的黏粒含量 QL 显著高于 QN ($P<0.05$), 显著低于 WS; $2\sim5\text{ }\mu\text{m}$ 的细粉粒含量 QL 显著高于 QN, 与其他植被类型的差异不显著($P>0.05$); $5\sim10\text{ }\mu\text{m}$ 的中粉粒含量 QL 显著低于 QSY、WS、WY, 与 QS、QN、WC 差异不显著; $10\sim100\text{ }\mu\text{m}$ 的粗粉粒含量 QL 显著高于 QN, 显著低于 WS、WC, 与 QS、QSY、WY 间的差异不显著; $100\sim250\text{ }\mu\text{m}$ 的细砂粒含量 QL 显著低于 QS、QN, 显著高于 WC, 与 QSY、WS、WY 差异不显著; $250\sim500\text{ }\mu\text{m}$ 的中砂粒和 $500\sim2\text{ }000\text{ }\mu\text{m}$ 的粗砂粒含量均显著高于其他植被类型。

表 3 不同植被类型的土壤紧实度

Table 3 Soil compaction of different vegetation type

植被类型 Vegetation type	土壤深度 Soil depth (cm)				
	0	2.5	5.0	7.5	10.0
QS	365.62±61.30Eabc	532.02±53.77Db	737.74±88.69Cbc	953.76±145.69Bb	1 171.11±240.73Ab
QSY	336.16±62.43Ebc	486.76±59.14Dbc	655.46±74.93Cbc	780.01±108.32Bb	891.91±148.67Abc
QN	358.62±57.24Cbc	505.66±72.60Bbc	624.66±67.77ABbc	656.91±104.68Ab	694.10±160.02Ac
QL	457.23±136.88Ca	775.88±232.76BCa	1245.38±420.09ABa	1561.19±590.64Aa	1773.14±762.85Aa
WS	406.47±50.26Dab	532.43±57.99Cb	705.94±84.50Bbc	791.51±97.02Bb	889.17±143.50Abc
WY	300.37±89.90Cc	400.22±75.21Cc	543.07±82.25Bc	620.71±119.09ABb	704.52±194.95Ac
WC	384.58±94.20Babc	542.19±130.61ABb	798.97±427.57ABb	925.36±586.56ABb	994.11±526.51Abc

同列数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$), 同行数据后不同大写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同

Data followed different lowercase letters within column indicate significant differences at 0.05 level, and data followed different capital letters at the same line indicate significant differences at 0.05 level. The same below

表 4 不同植被类型的土壤机械组成

Table 4 Soil mechanical composition of different vegetation types

植被类型 Vegetation type	土壤粒径 Soil particle size (μm)						
	<2	2~5	5~10	10~100	100~250	250~500	500~2 000
QS	1.14±0.27Db	0.84±0.24Da	0.69±0.34Dab	48.27±5.92Ac	44.54±3.75Bb	3.97±2.06Cb	0.55±1.13Dc
QSY	1.55±0.35Cab	1.30±0.38Ca	1.04±0.38Ca	49.33±7.45Ac	40.44±3.83Bbc	4.06±2.96Cb	2.28±4.07Cbc
QN	0.46±0.14Dc	0.27±0.13Db	0.15±0.21Dc	34.46±5.26Bd	54.89±2.81Aa	4.53±1.68Cb	5.26±4.44Cb
QL	1.16±0.48Db	0.84±0.43Da	0.50±0.48Dbc	45.11±10.63Ac	33.17±5.20Bcd	8.48±5.17Ca	10.75±8.74Ca
WS	1.77±1.24Ca	1.28±1.00Ca	1.17±0.96Ca	60.42±22.41Ab	28.62±18.09Bd	4.80±6.85Cb	1.95±3.99Cbc
WY	1.61±0.34Cab	1.32±0.37Ca	1.15±0.41Ca	55.24±1.83Abc	39.11±2.08Bbc	1.58±0.83Cb	0.00±0.00Dc
WC	1.52±0.16Ca	0.95±0.15Ca	0.28±0.29Cab	73.46±5.14Aa	22.98±3.99Bd	0.50±1.38Cc	0.30±0.90Ca

这表明所有植被类型中 10~100 和 100~250 μm 的粒径含量均显著高于其他粒径。除 QN 外, 其他植被类型的 10~100 和 100~250 μm 的粒径含量之和占总含量的 89.00% 以上, 且 10~100 μm 含量极显著高于 100~250 μm ($P<0.001$); QN 的 10~100 和 100~250 μm 的粒径含量之和占总含量的 78.28%, 100~250 μm 的粒径含量极显著高于 10~100 μm ($P<0.001$)。土壤粒径主要为 10~100 和 100~250 μm , 即粗粉粒和细砂粒含量最高, 土壤质地较粗, 在国际制属于砂土, 在中国制中属于粗砂土。此种质地的土壤孔隙较多、通气性较强, 降雨时水流下渗较快, 可以较好的避免径流的产生; 且保水保肥性较差、养分含量较低, 不利于植物汲取养分用于生长, 适合种植耐旱、耐贫瘠的植物。

2.3 不同植被类型的土壤化学性质

土壤 pH 值越低, 土壤颗粒之间的结合力就越弱, 土壤抗蚀性也就越差。由图 2 可见, 不同植被类型的土壤 pH 值变化存在显著差异($P<0.05$), 其平均值为 7.57~8.55。其中, QL 土壤 pH 值最大, 显著高于 QS、QSY、QN、WS、WY、WC。有植被覆盖可以显著降低土壤 pH 值($P<0.001$), 即土壤碱性降低; 降低土壤碱性的效果为 20 a 乔木林>退化草地>40 a 乔木林>人工柠条灌木林。不同植被类型下土壤有机质含量平均值在 0~5 cm 土层为 6.05~16.71 g/kg。QL 土壤有机质含量最低, 显著低于其他植被类型; WC 含量最高; 土壤有机质含量依次为 WC>WY>QN>QS>QSY>WS>QL。退化草地的土壤有机质含量最高, 其次是人工乔木林、人工柠条灌木林, 裸地最低。土壤全碳含量平均值为 9.57~16.89 g/kg, 土壤全氮含量平均值的取值范围为 0.38~0.93 g/kg。7 种植被类型的土壤全碳含量均存在显著性差异。其中, QL 的土壤全碳含量最低, WC

的最高; QS、QSY、QN、WS、WY、WC 与 QL 相比分别增加 10.30%、11.53%、16.35%、40.66%、32.21%、76.50%, 其中 QN、WS、WY、WC 均显著高于 QL, QS、QSY 与 QL 差异不显著。7 种植被类型的土壤全氮含量均存在显著性差异, QS、QSY、QN、WS、WY、WC 均显著高于 QL ($P<0.05$), 分别增加 82.64%、75.32%、89.08%、73.66%、72.79%、144.40%。植被覆盖可以显著提高土壤全碳、全氮含量($P<0.05$), 退化草地的土壤全碳、全氮含量最高, 其次是 40 a 乔木林, 人工柠条灌木林和 20 a 乔木林略高于裸地。

2.4 不同植被类型对土壤可蚀性 K 因子的影响

K 因子和土壤抗蚀性呈负相关关系, 即 K 因子越小, 土壤抗蚀性越强, 土壤流失风险越低。不同植被类型下土壤可蚀性 K 因子平均值为 0.033 1~0.045 6 (图 3)。WS 与 QL 相比显著增加 27.60% ($P<0.05$); QS、QSY、QN、WY、WC 与 QL 间差异不显著。除 40 a 人工油松林外, 其他乔木林、灌木林、退化草地均可降低土壤可蚀性 K 因子, 即增强土壤抗蚀性。

2.5 不同植被类型对土壤抗蚀性关键因子的主成分分析

选取土壤可蚀性 K 因子(X_1)、土壤紧实度(X_2)、土壤黏结力(X_3)、土壤全氮(X_4)、土壤全碳(X_5)、土壤有机质(X_6)、土壤 pH(X_7)、湿筛平均重量直径(X_8)、饱和导水率(X_9)、砂粒含量(X_{10})、粉粒含量(X_{11})、黏粒含量(X_{12})、地表糙度(X_{13})共 13 个指标的数据进行标准化处理后, 进行主成分分析。本研究 KMO 值为 0.674, 大于 0.6; 巴特利特球形度检验中近似卡方值为 298.474, 自由度为 78, 显著性为 0.000, 小于 0.05。因此, 该样本的数据可以进一步用于主成分分析。

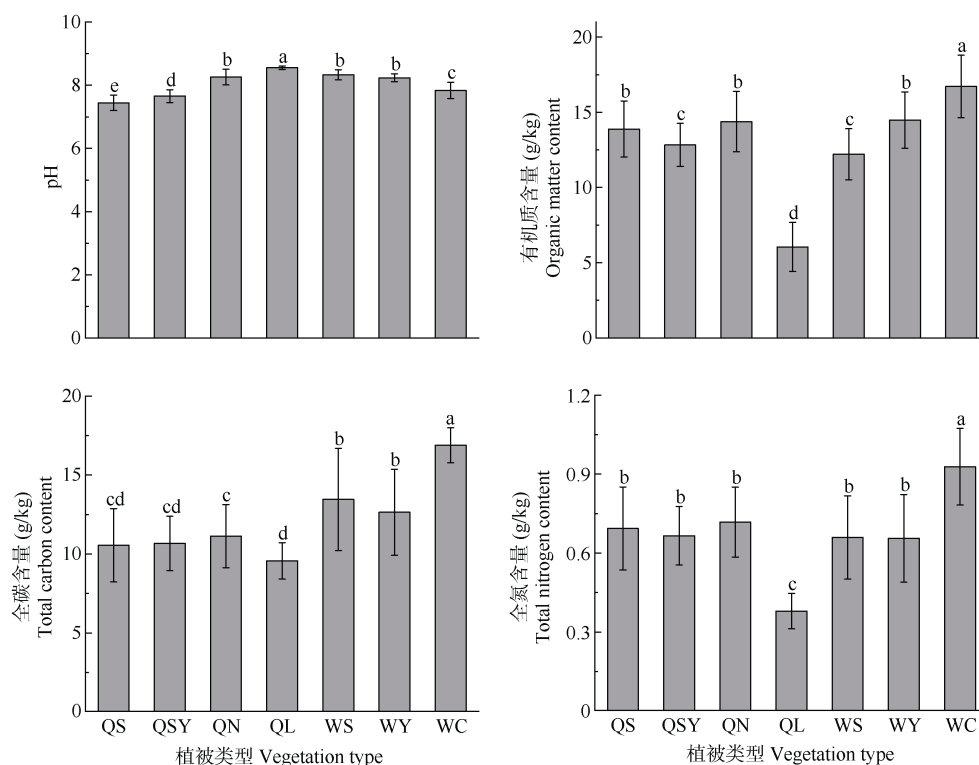


图2 不同植被类型的土壤化学性质

Fig. 2 Soil chemical properties of different vegetation types

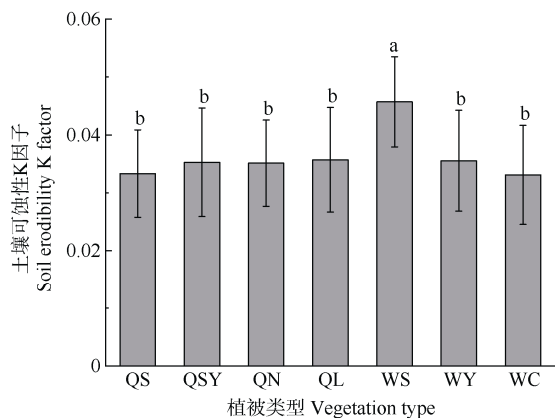


图3 不同植被类型土壤可蚀性K因子

Fig. 3 Soil erodibility K factor of different vegetation types

由表5可见, 4个主成分特征值均大于1, 累积贡献率为77.825, 达到主成分分析标准, 可进一步分析计算。在第一主成分中, X_4 、 X_5 对土壤抗蚀性有较大影响, 相关系数均大于0.7, 第一主成分的贡献率在25.754, X_4 、 X_5 与土壤抗蚀性呈正相关, 即土壤抗蚀性随 X_4 、 X_5 的增加而增加。第二主成分中, X_3 、 X_{11} 、 X_{12} 、 X_{13} 相关系数均大于0.5, 而且第二主成分的贡献率在23.844, 故这4项指标也能较好反映土壤抗蚀性, X_3 、 X_{11} 、 X_{12} 、

X_{13} 与土壤抗蚀性呈正相关, 即土壤抗蚀性随 X_3 、 X_{11} 、 X_{12} 、 X_{13} 的增加而增加。第三主成分中, X_2 、 X_6 、 X_9 的相关系数绝对值大于0.6, 贡献率为17.077, X_6 、 X_9 与土壤抗蚀性呈正相关, X_2 与土壤抗蚀性呈负相关。第四主成分中, X_1 、 X_7 相关系数大于0.7, 贡献率为11.15, 均与土壤抗蚀性呈正相关。

由表6可见, 土壤抗蚀性综合得分表现为 $WS > WC > WY > QSY > QS > QN > QL$, WS土壤抗蚀性最好, QN土壤抗蚀性最差。与QL相比, QS、QSY、WS、WY、WC的土壤抗蚀性分别增加47.87%、84.46%、256.89%、180.20%、237.59%, QN的土壤抗蚀性减少了107.27%。

不同植被类型土壤抗蚀性与环境因子间存在综合影响(图4), 对土壤物理性质、化学性质的相关指标进行主成分分析, 提取了土壤抗蚀性关键因子的2个主轴, 总方差解释率为54.4%。 X_4 、 X_6 、 X_{10} 、 X_{11} 、 X_{12} 对群落变化影响的强度最大, 其中第一轴与 X_4 、 X_5 、 X_6 、 X_{11} 、 X_{13} 呈显著正相关关系, 与其他环境因子呈显著负相关关系, 方差解释率为34.9%。第二轴与 X_2 、 X_7 呈显著正相关, 与 X_9 呈负相关, 方差解释率为19.5%。

表 5 土壤抗蚀指标成分矩阵

Table 5 Component matrix of soil erosion resistance index

指标 Index	主成分 Principal component			
	F_1	F_2	F_3	F_4
土壤可蚀性 K 因子 Soil erodibility K factor (X_1)	-0.130	0.332	0.162	0.760
土壤紧实度 Soil compactness (X_2)	-0.274	-0.048	-0.863	0.006
土壤黏结力 Soil cohesion (X_3)	-0.322	0.828	0.032	-0.070
土壤全氮 Soil total nitrogen (X_4)	0.708	-0.068	0.402	-0.129
土壤全碳 Total soil carbon (X_5)	0.875	0.224	-0.012	0.114
土壤有机质 Soil organic matter (X_6)	0.507	0.085	0.666	-0.273
土壤 pH Soil pH (X_7)	-0.022	-0.244	-0.279	0.826
湿筛平均重量直径 Wet sieve average weight diameter (X_8)	-0.826	-0.009	-0.084	0.147
饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity(X_9)	-0.235	-0.128	0.738	-0.010
砂粒含量 Sand content (X_{10})	-0.634	-0.724	0.112	0.028
粉粒含量 Percentage of fine particles (X_{11})	0.643	0.712	-0.101	-0.053
黏粒含量 Clay content (X_{12})	0.205	0.890	-0.099	0.061
地表糙度 Surface roughness (X_{13})	0.180	0.583	0.424	0.227
特征值 Eigenvalue	3.348	3.100	2.220	1.450
贡献率 Contribution rate /%	25.754	23.844	17.077	11.150
累积贡献率 Cumulative contribution rate /%	25.754	49.598	66.675	77.825

表 6 不同植被类型土壤抗蚀性主成分综合得分

Table 6 Comprehensive scores of principal components of soil corrosion resistance of different vegetation types

植被类型 Vegetation type	主成分 Principal component				综合得分 Composite score	排名 Ranking
	F_1	F_2	F_3	F_4		
QS	-0.706	0.224	0.522	-1.104	-0.208	5
QSY	-0.592	0.417	0.400	-0.566	-0.062	4
QN	-0.021	-2.037	0.838	0.333	-0.399	6
QL	-0.855	-0.462	-2.076	0.367	-0.827	7
WS	0.013	1.139	0.391	1.312	0.626	1
WY	0.224	0.425	0.383	0.226	0.320	3
WC	1.936	0.294	-0.458	-0.568	0.549	2

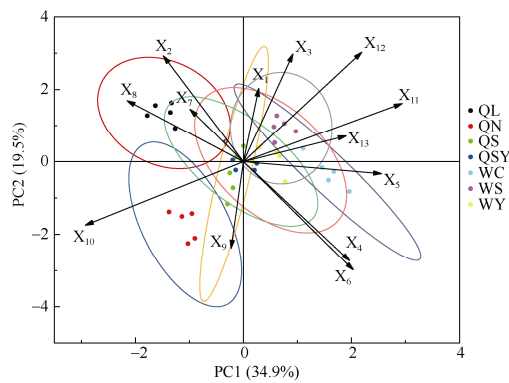


图 4 主成分分析。X₁~X₁₃ 见表 5。

Fig. 4 Principal component analysis. X₁~X₁₃ see Table 5.

3 讨论和结论

3.1 植被类型对植物群落分布特征

40 a 人工乔木林植物多样性最高，苔藓植物在

40 a 人工油松林下 α 多样性最大，人工乔木林枝繁叶茂，地表光照较少，水分蒸发量也较小，适合苔藓植物生长。其次，人工乔木林枯枝落叶等有机物较多，经分解后可以为苔藓植物生长提供养分。人工柠条灌木林没有苔藓植物分布，这可能是因为灌木林气候比较干燥，土壤较为贫瘠，光照条件也不能满足苔藓植物的生长所需。草本植物在 40 a 人工杨树林下 α 多样性最大，这可能是因为其土壤肥力、水分状况以及气候环境较为优越，为草本植物生长发育提供了更好的环境条件和物质基础；在 40 a 人工油松林下 α 多样性最小，是由于树冠的遮挡，郁闭度较高，阳光照射不够充分，对草本植物的生长有一定的限制，但此植被类型下苔藓植物分布均匀，物种丰富度较大，表明良好的遮荫环境更适宜苔藓植物生存。

3.2 植被类型对土壤物理性质的影响

地表糙度是指地表形态的粗糙程度，地表糙度

越大, 土壤抗蚀性就越强。本研究结果表明, 不同植被类型的地表糙度依次为人工乔木林>退化草地>人工柠条灌木林>裸地, 这与于国强等^[27]的研究结果一致。人工乔木林的地表糙度最大, 是因为植被覆盖较高、枝叶茂密, 对风蚀和水蚀有较大的阻力。退化草地的地表糙度低于乔木林, 是因为草本植物单株高度较低, 地面覆盖度不高, 无法提供足够的阻力。人工柠条灌木林的地表较低, 其原因可能是植株高度相对较低, 枝条结构相对简单且之间的空隙较大, 风可以比较容易地穿过植被, 不会遭受太大的阻力, 从而减少了地表的粗糙程度。裸地的地表糙度最小, 这是因为裸地缺乏有效的植被覆盖, 导致没有足够的物理障碍物来阻止风的吹动和水的流动。

土壤黏结力用于评价土壤的稳定性和抗蚀性。实验结果表明土壤黏结力依次为人工乔木林>裸地>退化草地>人工柠条灌木林。人工乔木林土壤黏结力大于裸地与 Weni 等^[28]的研究结果一致。人工乔木林的树木根系可以增加土壤的稳定性和紧密度, 枯枝落叶分解后的有机质与土壤颗粒结合, 都增加了乔木林的土壤黏结力。退化草地和人工柠条灌木林的土壤黏结力低于裸地, 本研究结果表明人工柠条灌木林会改变土壤颗粒组成。在宁夏盐池和内蒙古乌拉特荒漠草原柠条灌木林中, 盐池柠条灌木林显著提高了中砂粒含量, 降低了土壤黏粒含量^[29]。土壤有机质对土壤黏结力有一定影响, 但当土壤水分减少时, 可能削弱了有机质对土壤黏结力的积极作用, 导致土壤黏结力仍低于裸地^[30]。

饱和导水率是评价土壤渗透性能的重要指标之一。从人工柠条灌木林、20 a 人工乔木林、40 a 人工乔木林、退化草地到裸地, 饱和导水率呈逐渐降低的趋势, 这与李青林等^[31]的研究结果一致。人工柠条灌木林具有较为发达的根系和茂密的枝叶, 这些因素有助于增加土壤的孔隙度和水分持留能力, 从而提高了土壤的饱和导水率; 人工乔木林次之; 退化草地的植被覆盖低于正常草地, 致使土壤结构疏松, 水分持留能力降低, 故饱和导水率降低; 裸地由于缺乏任何植被覆盖, 其土壤孔隙度极低, 水分持留能力几乎为零, 因此饱和导水率最低。

通过湿筛法测定土壤团聚体平均重量直径, 本研究结果表明不同植被类型的平均重量直径从大到小依次为: 裸地、20 a 人工乔木林、人工柠条灌木林、40 a 人工乔木林、退化草地。裸地平均重量

直径最大可能是因为地表没有植被覆盖, 土壤板结较为严重, 大团聚体含量较高。除裸地外, 人工乔木林和天然灌木林的平均重量直径大于退化草地, 这与前人^[32]的研究结果一致。这是因为人工乔木林和天然灌木林根系发育优于退化草地, 且枯枝落叶较多可提供大量有机物, 促进土壤颗粒之间的黏结和团聚, 故平均重量直径较大。

土壤紧实度越高, 土壤中的孔隙度就越小, 导致空气和水分无法流通, 进而影响土壤的透气性和渗透性^[33]。本研究结果表明土壤紧实度依次为裸地>20 a 人工油松林>退化草地>40 a 人工油松林>20 a 人工松杨混合林>人工柠条灌木林>40 a 人工杨树林, 这与张毅川等^[34]的研究结果相似。40 a 人工杨树林的土壤紧实度最小, 可能是因为其根系发达, 能够有效地疏松土壤, 从而减少了土壤紧实度。人工柠条灌木林的土壤紧实度也相对较小, 可能是因为柠条灌木的根系分布比较广泛, 其生长环境较为干旱, 故其根系更加发达, 疏松土壤, 降低土壤紧实度。40 a 人工油松林土壤紧实度大于 40 a 人工杨树林, 可能是因为油松的树干和分支相对较长, 重量较大, 在生长过程中对土壤施加更大的压力, 从而增加了土壤紧实度。20 a 人工油松林和松杨混合林土壤紧实度较高, 可能是因为种植年限较短, 对土壤紧实度的影响较小。退化草地和裸地的土壤紧实度较大, 可能是因为无植被覆盖或植被覆盖度较低, 缺乏足够的植被保护, 水分蒸发速度快、土壤含水量低, 从而增加了土壤紧实度。

土壤机械组成是指土壤中矿物颗粒的大小及其组成比例, 对土壤紧实度、通透性以及肥力都有重要影响, 也在一定程度影响土壤抗蚀性。一般来说, 粒径较大的砂颗粒能够提高土壤的透水性和抗压性, 但也容易受到水流的冲刷; 而粒径较小的粘粒和黏粒则具有较好的抗蚀性, 但透水性较差。7 种植被类型的土壤粒径主要集中在 10~250 μm , 这与赵海霞等^[35]的研究结果一致。皇甫川流域地处风沙区与黄土高原的过渡地带, 特殊的地理位置使其土壤受到沙化影响, 质地较粗。与典型黄土高原相比, 皇甫川流域的栗钙土、黄绵土的养分偏低, 质地较粗^[36]。该地区是典型的温带半干旱气候, 气温高、降水少、蒸发强烈, 这种气候条件会导致土壤中细粒子逐渐丧失水分, 粘结力变弱, 颗粒变大。相比之下, 湿润区(如南方)化学风化主导, 黏粒生成多。非风沙区的土壤粒径分布通常更均匀, 黏粒

含量更高,而皇甫川流域受风沙影响显著,土壤质地偏砂性^[35]。

3.3 植被类型对土壤化学性质的影响

土壤 pH 对土壤肥力、作物生长和生态环境都有着重要的影响。本研究结果表明不同植被类型下土壤 pH 依次为裸地>40 a 人工油松林>人工柠条灌木林>40 a 人工杨树林>退化草地>20 a 人工乔木林,说明植被覆盖可以改善土壤碱化现象,这与吕国红等^[37]的研究结果一致。裸地上没有任何植被覆盖物,阳光直射土壤表面,使得土壤温度升高,水分蒸发速度加快,从而导致土壤中含盐量增多,土壤呈碱性。人工乔木林、人工柠条灌木林、退化草地的土壤 pH 均低于裸地,可能与植被的根系分泌物有关,这些分泌物可以改变土壤的化学性质,导致酸化^[38]。土壤酸化还会影响土壤微生物的活性和群落结构,进一步降低生态系统的稳定性。

有机质含量、土壤总碳和总氮含量是衡量土壤肥力和生态系统健康状况的重要指标。本研究结果表明从退化草地、人工乔木林、人工柠条灌木林到裸地,有机质含量、土壤全碳和全氮含量呈现逐渐降低趋势,这与前人的研究结果一致^[39]。退化草地的有机质含量、土壤全碳和全氮含量最高,这可能是因为退化草地中植被覆盖率较高,植物残体和根系分解产生的有机物质不断向土壤中输入,从而提高了土壤的碳、氮含量。人工乔木林和人工柠条灌木林的有机质含量、土壤全碳和全氮含量略低于退化草地,但具有一定的土壤保护和改良作用,能够防止水流冲刷、土壤侵蚀和养分流失等问题,其枯枝落叶以及林中的其他植物也能够促进土壤中有有机物和碳、氮的积累,从而保持土壤碳、氮含量。相比之下,裸地中没有任何植被保护,土壤暴露在空气和水流中,极易导致水分和养分的流失,同时也容易出现土壤侵蚀。

3.4 植被类型对土壤可蚀性 K 因子的影响

土壤可蚀性 K 因子描述了当土壤表面暴露在风、水等自然力作用下时土壤颗粒的抵抗力和固结程度,进而反映了土壤的强度、稳定性和易损性。一般与土壤抗蚀性成反比,其值越小土壤抗蚀性越大^[40]。本研究结果表明土壤可蚀性 K 因子依次为 40 a 人工油松林>裸地>40 a 人工杨树林>20 a 人工松杨混合林>人工柠条灌木林>20 a 人工油松林>退化草地。除 40 a 人工油松林外,其余植被类型土壤可蚀性 K 因子的值均小于裸地,这与张金池等^[41]

的研究结果一致。40 a 人工杨树林、20 a 人工松杨混合林、人工柠条灌木林、20 a 人工油松林、退化草地的地表均有植被覆盖,其丰富的物种组成形成了发达的根系系统以及根际微生物群落提高了土壤的结构稳定性和抗蚀能力。40 a 人工油松林土壤可蚀性 K 因子大于裸地,这与张华渝等^[42]的研究结果一致,可能是因为油松林的树冠截留能力较弱,降雨直接击打土壤表面,土壤抗蚀性较差。

3.5 植被类型对土壤抗蚀性的影响

选取 13 个土壤抗蚀性指标用于综合评价皇甫川流域不同植被的土壤抗蚀差异,运用主成分分析方法,共提取 4 个主成分。研究表明土壤抗蚀性受到环境因子的综合影响,土壤抗蚀性依次为 40 a 人工松树林>退化草地>40 a 人工杨树林>20 a 人工松杨混合林>20 a 人工油松林>裸地>人工柠条灌木林。人工乔木林和退化草地的土壤抗蚀性强于裸地和人工柠条灌木林,这与唐夫凯^[43]的研究结果一致,乔木林土壤抗蚀性最强。人工乔木林和退化草地植被覆盖度较高,可有效遮盖土壤表面;根系也较为发达,能够更好的固定土壤;土壤含水量相对较高,能够吸收大量的雨水,形成深厚紧密的土层。裸地、人工柠条灌木林的土壤抗蚀性最差是因为无植被覆盖或植被覆盖度低,人工柠条灌木的根系相对较浅不能很好的固定土壤;土壤养分含量相对较低,土质疏松,极易受到风蚀水蚀,土壤抗蚀性较弱。在黄土高原的其他区域,如祁连山区,草地土壤的抗冲性也表现出类似特征^[44]。研究表明,草地植被通过根系和地表覆盖,显著提高了土壤的抗冲性^[45],黄土丘陵区的研究也表明不同植被覆盖类型对土壤抗蚀性的影响显著,草地和灌木林的土壤抗蚀性通常优于裸地^[46-47]。东北黑土区的研究表明不同土地利用方式下,土壤抗蚀性存在显著差异^[48]。例如,农林混作模式的土壤抗蚀性优于单一农用地^[49]。

本研究以皇甫川流域 7 种植被类型为研究,探究了不同植被类型对土壤理化性质、土壤力学指标以及土壤可蚀性 K 因子的影响,综合评价 7 种植被类型的土壤抗蚀性差异。结果表明,40 a 人工油松林下苔藓多样性最大且分布均匀,40 a 人工杨树林下草本多样性最大。研究区土壤质地粗,人工乔木林土壤黏结力优于裸地;人工乔木林、人工柠条灌木林的土壤物理化学性质优于裸地;不同植被类型下土壤 pH 均低于裸地。7 种植被类型土壤抗蚀性排序为 40 a 人工油松林>退化草地>40 a 人工杨树

林>20 a 松杨混合林>20 a 油松林>人工柠条灌木林>裸地, 人工乔木林最强, 其次为退化草地。

参考文献

- [1] SHI F H. Temporal and spatial changes of soil erosion and its driving factors in the middle reaches of the Yellow River Basin [D]. Xi'an: Chang'an University, 2022. [史飞航. 黄河流域中游土壤侵蚀时空变化及驱动因素研究 [D]. 西安: 长安大学, 2022.]
- [2] ZHANG J T. Theory and techniques of vegetation restoration and construction on Loess Plateau, China [J]. J Soil Water Conserv, 2004, 18(5): 120–124. [张金屯. 黄土高原植被恢复与建设的理论和技术问题 [J]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 120–124. doi: 10.3321/j.issn: 1009-2242.2004.05.030.]
- [3] XU W L. Land Degradation assessment and sediment yield in the Huangfuchuan Basin [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019. [许文龙. 皇甫川流域侵蚀产沙特征及土地退化研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.]
- [4] XIE X J, ZHANG B. Comprehensive evaluation on recovery of soil anti-erodibility by revegetation based on coupling relationship analysis [J]. Soils, 2019, 51(3): 609–616. [谢贤健, 张彬. 基于耦合关联分析的护岸植被恢复土壤抗蚀性综合评价 [J]. 土壤, 2019, 51(3): 609–616. doi: 10.13758/j.cnki.tr.2019.03.026.]
- [5] ZHANG N N, ZHOU Y, YAN J K, et al. Evaluation of pinus sylvestris var soil anti-erodibility based on the entropy method [J]. J Yulin Univ, 2019, 29(6): 48–52. [张宁宁, 周阳, 严加坤, 等. 基于熵权法的樟子松人工林土壤抗蚀性评价 [J]. 榆林学院学报, 2019, 29(6): 48–52. doi: 10.16752/j.cnki.jylu.2019.06.012.]
- [6] WANG H, ZHANG G H, LI N N, et al. Variation in soil erodibility under five typical land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China [J]. CATENA, 2019, 174: 24–35. doi: 10.1016/j.catena.2018.11.003.
- [7] NIE X G, LIANG B, YU W, et al. Soil anti-erodibility of different land-use modes in semiarid region of central Xizang [J]. J NW For Univ, 2018, 33(2): 43–47. [聂晓刚, 梁博, 喻武, 等. 藏中半干旱地区不同土地利用类型土壤抗蚀性研究 [J]. 西北林学院学报, 2018, 33(2): 43–47.]
- [8] GUO M M, CHEN Z X, WANG W L, et al. Revegetation induced change in soil erodibility as influenced by slope situation on the Loess Plateau [J]. Sci Total Environ, 2021, 772: 145540. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145540.
- [9] RINGNÉR M. What is principal component analysis? [J]. Nat Biotechnol, 2008, 26(3): 303–304. doi: 10.1038/nbt0308-303.
- [10] WU Y X, YU X X, JIA G D. Seasonal variation of soil erodibility under vegetation restoration in the agro-pastoral ecotone of northern China [J]. J Soil Sci Plant Nutr, 2023, 23(2): 2331–2343. doi: 10.1007/s42729-023-01183-w.
- [11] ZHANG J, XIE X J, WEI X C, et al. Soil anti-erodibility under *Pinus massoniana* forest at different ages in typical Karst area [J]. J NW A&F Univ (Nat Sci), 2023, 51(3): 51–61. [张军, 谢旭姣, 韦小茶, 等. 典型喀斯特地区不同龄级马尾松林土壤抗蚀性研究 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 51–61. doi: 10.13207/j.cnki.jnwf.2023.03.006.]
- [12] HUANG X, QIU L. Analysis of runoff variation and driving mechanism in Huangfuchuan River Basin in the middle reaches of the Yellow River, China [J]. Appl Water Sci, 2022, 12(10): 234. doi: 10.1007/s13201-022-01753-w.
- [13] DENG C, SUN W F, WU R W. Spatiotemporal variation of hydrological connectivity and their response to ecological engineering in the Huangfuchuan Basin, China [J]. J Hydroecol, 2025, 46(6): 93–103. [邓椿, 孙维峰, 武荣伟. 皇甫川流域水文连通性时空演变及其对生态工程的响应 [J]. 水生态学杂志, 2025, 46(6): 93–103. doi: 10.15928/j.1674-3075.202408100001.]
- [14] ZHANG Y R, HE Y, SONG J X. Effects of climate change and land use on runoff in the Huangfuchuan Basin, China [J]. J Hydrol, 2023, 626: 130195. doi: 10.1016/j.jhydrol.2023.130195.
- [15] WANG S J, YAN Y X, YAN M, et al. Quantitative estimation of the impact of precipitation and human activities on runoff change of the Huangfuchuan River Basin [J]. J Geogr Sci, 2012, 22(5): 906–918. doi: 10.1007/s11442-012-0972-8.
- [16] LIU Q, WEI F H, CHANG K F, et al. Characteristics of water and sediment variation in the Huangfuchuan Basin and its influencing factors [J]. Arid Zone Res, 2021, 38(6): 1506–1513. [刘强, 尉飞鸿, 常康飞, 等. 皇甫川流域水沙变化特征及其影响因素 [J]. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1506–1513. doi: 10.13866/j.azr.2021.06.02.]
- [17] LUO R F. Study on the changes of the soil animal community features under the condition of different water-soil erosion controlling methods in Huangfuchuan Watershed [D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2009. [罗瑞芳. 皇甫川流域不同治理措施下土壤动物群落特征的变化研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2009.]
- [18] QIAN Q Y, QIN F C, LI L, et al. Spatial heterogeneity of surface roughness of slope erosion under natural rainfall [J]. J Soil Water Conserv, 2021, 35(3): 46–52. [钱秋颖, 秦富仓, 李龙, 等. 自然降雨条件下坡面侵蚀地表粗糙度的空间异质性 [J]. 水土保持学报, 2021, 35(3): 46–52. doi: 10.13870/j.cnki.stbxb.2021.03.007.]
- [19] ZHAO Y S, WANG K Q, XIN Y. Soil and Water Conservation and Desertification Combating Experiments [M]. Beijing: China Forestry

- Publishing House, 2013: 1–290. [赵雨森, 王克勤, 辛颖. 水土保持与荒漠化防治实验教程 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2013: 1–290.]
- [20] LI N N, ZHANG G H, WANG H, et al. Soil anti-erodibility influenced by biological crusts in Loess Hilly and Gully Region [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2020, 18(1): 42–48. [李宁宁, 张光辉, 王浩, 等. 黄土丘陵沟壑区生物结皮对土壤抗蚀性能的影响 [J]. *中国水土保持科学*, 2020, 18(1): 42–48. doi: 10.16843/j.sswc.2020.01.006.]
- [21] WANG S S, BI H X, CUI Y H, et al. Key indexes and characteristics of soil anti-erodibility of *Robinia pseudoacacia* with different densities in loess region of western Shanxi Province, northern China [J]. *J Beijing For Univ*, 2022, 44(5): 94–104. [王珊珊, 毕华兴, 崔艳红, 等. 晋西黄土区不同密度刺槐林土壤抗蚀性关键指标及特征研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2022, 44(5): 94–104. doi: 10.12171/j.1000-1522.2020.0226.]
- [22] TIAN X Z, XU L X, SONG J F, et al. Effects of soil compaction on root H_2S and sulfur metabolic enzymes of young apple tree with different rootstocks [J]. *Plant Physiol J*, 2020, 56(9): 1845–1853. [田孝志, 徐龙晓, 宋建飞, 等. 土壤紧实度对不同砧木苹果幼树根系 H_2S 及硫代谢酶的影响 [J]. *植物生理学报*, 2020, 56(9): 1845–1853. doi: 10.13592/j.cnki.ppj.2020.0177.]
- [23] BAO S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [24] DU Y S, WU L P, CHEN J, et al. Effects of understory invasive plants and native plants on community stability in Benggang ecological restoration of different artificial forests [J]. *Acta Ecol Sin*, 2024, 44(4): 1588–1600. [杜雨霜, 吴丽萍, 陈杰, 等. 崩岗生态修复不同人工林林下入侵植物和本土植物对群落稳定性的影响 [J]. *生态学报*, 2024, 44(4): 1588–1600. doi: 10.20103/j.stxb.202304010641.]
- [25] ZHANG K L, SHU A P, XU X L, et al. Soil erodibility and its estimation for agricultural soils in China [J]. *J Arid Environ*, 2008, 72(6): 1002–1011. doi: 10.1016/j.jaridenv.2007.11.018.
- [26] ZI R Y, ZHAO L S, QIAN X H, et al. Relationship between soil anti-scourability and soil physical properties in Karst Mountain Areas [J]. *J Soil Water Conserv*, 2022, 36(3): 23–29. [资如毅, 赵龙山, 钱晓鹤, 等. 喀斯特高原山地土壤抗冲性与土壤物理性质的关系 [J]. *水土保持学报*, 2022, 36(3): 23–29. doi: 10.13870/j.cnki.stbxb.2022.03.004.]
- [27] YU G Q, LI Z B, LI P, et al. Effects of vegetation types on hillslope runoff-erosion and sediment yield [J]. *Adv Water Sci*, 2010, 21(5): 593–599. [于国强, 李占斌, 李鹏, 等. 不同植被类型的坡面径流侵蚀产沙试验研究 [J]. *水科学进展*, 2010, 21(5): 593–599. doi: 10.14042/j.cnki.32.1309.2010.05.024.]
- [28] WEN H, NI S M, WANG J G, et al. Changes of soil quality induced by different vegetation restoration in the collapsing gully erosion areas of southern China [J]. *Int Soil Water Conserv Res*, 2021, 9(2): 195–206. doi: 10.1016/j.iswcr.2020.09.006.
- [29] JIANG J Y, LIU R T, ZHANG A N. Comparative analysis of soil fractal dimension and soil physical and chemical properties between *Caragana korshinskii* shrub plantations in arid and semi-arid desert steppe [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2021, 28(4): 54–61. [蒋嘉瑜, 刘任涛, 张安宁. 干旱与半干旱荒漠草原区柠条灌丛土壤分形维数与理化性质对比分析 [J]. *水土保持研究*, 2021, 28(4): 54–61. doi: 10.13869/j.cnki.rswc.2021.04.008.]
- [30] LIU J, GOU Q Q, WANG G H, et al. Changes of vegetation community and soil characteristics of 50 years old artificial *Caragana korshinskii* in sandy-hilly region of northwest Shanxi Province [J]. *J Soil Water Conserv*, 2022, 36(1): 219–230. [刘婧, 綦倩倩, 王国华, 等. 晋西北丘陵风沙区 50 年林龄人工柠条林植被群落及其土壤特性变化 [J]. *水土保持学报*, 2022, 36(1): 219–230. doi: 10.13870/j.cnki.stbxb.2022.01.029.]
- [31] LI Q L, YANG J, WANG K, et al. Comparison of saturated water carrying capacity and water holding capacity of artificial green land with different vegetation types [J]. *Chin J Soil Sci*, 2021, 52(4): 828–835. [李青林, 杨静, 王琨, 等. 不同植被类型人工绿地土壤饱和导水能力、持水特征的比较 [J]. *土壤通报*, 2021, 52(4): 828–835. doi: 10.19336/j.cnki.trtb.2020070503.]
- [32] ZHAO S W, SU J, YANG Y H, et al. Influence of the soil structure in Loess Hilly Region of southern Ningxia under different man-made vegetation [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2005, 12(3): 27–28. [赵世伟, 苏静, 杨永辉, 等. 宁南黄土丘陵区植被恢复对土壤团聚体稳定性的影响 [J]. *水土保持研究*, 2005, 12(3): 27–28. doi: 10.3969/j.issn.1005-3409.2005.03.009.]
- [33] CHENG H, CHENG Y L, GONG Y B, et al. Hydrological effect of six soil types in northwestern Sichuan alpine and subalpine mountains [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2019, 25(2): 225–231. [程欢, 程一伦, 宫澜波, 等. 川西北高山/亚高山区 6 种典型土壤类型水文效应 [J]. *应用与环境生物学报*, 2019, 25(2): 225–231. doi: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2018.05041.]
- [34] ZHANG Y C, TIAN L, SUN Y, et al. Water-related physical properties of soil under different vegetation types in urban park' green spaces [J]. *J Chin Urban For*, 2022, 20(3): 42–47. [张毅川, 田莉, 孙杨, 等. 城市公园绿地不同植被类型土壤水分相关物理性质 [J]. *中国城市林业*, 2022, 20(3): 42–47. doi: 10.12169/zgcsly.2021.09.28.0004.]
- [35] ZHAO H X, LI B, LIU Y H, et al. The soil properties along landscape heterogeneity on different scales in Huangfuchuan Watershed [J]. *Acta*

- Ecol Sin, 2005, 25(8): 2010–2018. [赵海霞, 李波, 刘颖慧, 等. 皇甫川流域不同尺度景观分异下的土壤性状 [J]. 生态学报, 2005, 25(8): 2010–2018. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2005.08.026.]
- [36] PAN M H. Sediment sources study in typical dam-controlled catchment in the Loess Plateau areas of more sediment and coarse sediment region [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021. [潘明航. 黄土高原多沙粗沙区典型坝控流域泥沙来源研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2021. doi: 10.27398/d.cnki.gxalu.2021.000667.]
- [37] LÜ G H, ZHOU G S, JI Y H. The study on soil carbon and nitrogen for main plant communities in Liaohe Delta [C]// Proceedings of the Symposium on Ecological Meteorological Business Construction and Agricultural Meteorological Disaster Warning at the 2007 Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society. Guangzhou: Chinese Society of Climatology, 2007: 720–730. [吕国红, 周广胜, 汲玉河. 辽河三角洲主要植被类型土壤碳氮含量分析 [C]// 中国气象学会 2007 年年会生态气象业务建设与农业气象灾害预警分会场论文集. 广州: 中国气象学会, 2007: 720–730.]
- [38] ZHANG J H, CAI D X, LU L H, et al. Soil ecological stoichiometry of different aged teak (*Tectona grandis*) plantations [J]. Acta Ecol Sin, 2020, 40(16): 5718–5728. [张继辉, 蔡道雄, 卢立华, 等. 不同林龄柚木人工林土壤生态化学计量特征 [J]. 生态学报, 2020, 40(16): 5718–5728. doi: 10.5846/stxb201911182494.]
- [39] WANG L X, LIU J X, CHAI B F. Response of soil bacterial community and nitrogen cycle during the natural recovery of abandoned farmland in subalpine of the north China [J]. Ecol Environ Sci, 2022, 31(8): 1537–1546. [王礼霄, 刘晋仙, 柴宝峰. 华北亚高山土壤细菌群落及氮循环对退耕还草的响应 [J]. 生态环境学报, 2022, 31(8): 1537–1546. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2022.08.005.]
- [40] ZHU B B, LI Z B, LI P, et al. Research on the fractal features of soil aggregate, and dynamic changes in anti-erodibility during the process of vegetation recovery on the Loess Hilly areas [J]. J Xi'an Univ Technol, 2009, 25(4): 377–382. [朱冰冰, 李占斌, 李鹏, 等. 黄丘区植被恢复过程中土壤团粒分形特征及抗蚀性演变 [J]. 西安理工大学学报, 2009, 25(4): 377–382. doi: 10.3969/j.issn.1006-4710.2009.04.001.]
- [41] ZHANG J C, LI H D, LIN J, et al. Spatial variability of soil erodibility (K-factor) at a catchment scale in China [J]. Acta Ecol Sin, 2008, 28(5): 2199–2206. [张金池, 李海东, 林杰, 等. 基于小流域尺度的土壤可蚀性 K 值空间变异 [J]. 生态学报, 2008, 28(5): 2199–2206. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2008.05.036.]
- [42] ZHANG H Y, WANG K Q, SONG Y L. Soil erosion resistance under different land use types in Jianshan River watershed in middle Yunnan Province [J]. J Soil Water Conserv, 2019, 33(5): 50–57. [张华渝, 王克勤, 宋娅丽. 滇中尖山河流域不同土地利用类型土壤抗蚀性 [J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 50–57. doi: 10.13870/j.cnki.stbxb.2019.05.008.]
- [43] TANG F K. Study of soil anti-erodibility of different land use types in karst valley region [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2016. [唐夫凯. 岩溶峡谷区不同土地利用方式土壤抗蚀性研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016.]
- [44] MA J L, WANG B. Research progress of soil anti-scourability from 1962 to 2022 [J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2023, 39(17): 19–28. [马金龙, 王兵. 1962—2022 年土壤抗冲性研究进展 [J]. 农业工程学报, 2023, 39(17): 19–28. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202302090.]
- [45] WANG H, WANG J, ZHANG G H. Impact of landscape positions on soil erodibility indices in typical vegetation-restored slope-gully systems on the Loess Plateau of China [J]. Catena, 2021, 201: 105235. doi: 10.1016/j.catena.2021.105235.
- [46] RAN M Y, ZHAO Y G, LIU Y L, et al. Soil anti-scourability of biological soil crust with different coverage in Loess Hilly Region [J]. Soil Water Conserv China, 2011(12): 43–45. [冉茂勇, 赵允格, 刘玉兰, 等. 黄土丘陵区不同盖度生物结皮土壤抗冲性研究 [J]. 中国水土保持, 2011(12): 43–45. doi: 10.3969/j.issn.1000-0941.2011.12.014.]
- [47] DONG L B, LI J W, ZHANG Y, et al. Effects of vegetation restoration types on soil nutrients and soil erodibility regulated by slope positions on the Loess Plateau [J]. J Environ Manag, 2022, 302: 113–985. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113985.
- [48] CHEN S Q, ZHANG G H, ZHU P Z, et al. Impact of land use type on soil erodibility in a small watershed of rolling hill northeast China [J]. Soil Till Res, 2023, 227: 105–597. doi: 10.1016/j.still.2022.105597.
- [49] SHI D M, CHEN Y. The influencing factors of soil anti-scourability of tree-crop intercropping land in Purple Soil Hilly Region [J]. Sci Agric Sin, 2008, 41(5): 1400–1409. [史东梅, 陈晏. 紫色丘陵区农林混作模式的土壤抗冲性影响因素 [J]. 中国农业科学, 2008, 41(5): 1400–1409. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2008.05.018.]