

排序法在植物群落与环境关系研究中的应用述评

段后浪¹, 赵安^{1*}, 姚忠²

(1. 江西师范大学鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 地理与环境学院, 南昌 330022; 2. 江西省科学院, 南昌 330096)

摘要: 自然环境对植物的影响主要表现在气候、水文、土壤及地形方面。大尺度上, 气候类型明显影响植物的带状分布与物种空间格局; 中小尺度上, 土壤、水文、地形以及三者的交互作用影响植物生长必需的环境与资源条件, 并对植物群落物种多样性起决定性作用。多元数量分析是研究植物群落生态关系的重要方法, 在揭示植物群落与环境关系方面起到关键作用。排序法作为数量分析的重要手段, 经常在植物生态学研究 中扮演重要角色, 尤其是在植物群落分布以及群落结构方面的应用已形成一种趋势。主要从植物群落分布以及群落结构的角度综述了当今排序法的应用, 分析了面临的主要问题, 并提出了未来可能发展方向, 以期 为今后排序方法的选择应用提供参考。

关键词: 数量分析; 排序法; 植物群落; 环境因子

doi: 10.11926/jtsb.3670

Overview of Ordination Methods Application in Relationship between Plant Community and Environment

DUAN Hou-lang¹, ZHAO An^{1*}, YAO Zhong²

(1. Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, School of Geography and Environmental Sciences, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China; 2. Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330096, China)

Abstract: The nature environment affects plants mainly in the aspect of climate, hydrology, soil and terrain. On large scales, climate type obviously affects the zonal distribution and spatial patterns of plant species. On medium and small scales, soil, hydrology, topography and their interaction usually affect the necessary environment and resource condition for plant growth, and even becoming decisive factors on species diversity in plant community. Multivariate quantitative analysis is an important method in researching ecology relationship of plant community, and plays a key role in revealing the relationship between plant community and environment. As a powerful tool of quantitative analysis, ordination methods often play an important role in studying plant ecology, which become a trend in applying to plant community distribution and community structure. The application of ordination methods was reviewed from the angle of plant community distribution and community structure, the main problems were analyzed, and the development direction in future was proposed, so as to provide references for the choice of ordination methods in the future.

Key words: Quantitative analysis; Ordination methods; Plant community; Environment factor

植物群落与环境因子关系问题一直是生态学领域关注的热点之一, 尤其是环境条件对植物群落分布、物种多样性变化方面的成因机理解释近年成

为焦点^[1]。数量分析作为现代植被研究的重要手段, 于 20 世纪 50 年代引入植物生态学研究领域, 目前在内容和方法上日渐成熟^[2]。数量分类与排序作为

收稿日期: 2016-08-29

接受日期: 2016-11-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(81260449); 江西省青年科学基金项目(20132BAB214022); 江西省教育厅 2012 年度科技项目(CJJ12185)资助

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 81260449), the Jiangxi Province Science Foundation for Youths (Grant No. 20132BAB214022), and the Technology Project in 2012 of Jiangxi Education Department (Grant No. CJJ12185).

作者简介: 段后浪(1992~), 男, 硕士研究生, 从事植物生态学研究。E-mail: duanh12408@126.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: zhaoanjxsd@126.com。

数量分析最重要的组成部分,在解决植物群落与环境之间关系问题上扮演着其他方法无可替代的作用。数量分类根据植物群落之间的相似性,将其划分成不同组,使组内群落尽量相似,组间群落尽可能相异;排序法将样方或物种排列在一定空间,通过排序轴反映的生态梯度客观、准确地揭示植物群落分布以及群落物种多样性随环境梯度的变化规律^[3]。排序法分为间接排序法和直接排序法两种,前者只使用物种数据,需要进一步分析各排序轴的生态学意义,主要包括极点排序(Polar ordination, PO)、主成分分析(Principal component analysis, PCA)、对应分析(Correspondence analysis, CA)、除趋势对应分析(Detrended correspondence analysis, DCA)和无度量多维标度法(Non-metric multidimensional scaling, NMDS);后者同时使用物种与环境因子两种数据,排序轴的生态学意义一目了然,结果解释更加清晰,主要包括冗余分析(Redundancy analysis, RDA)、典范对应分析(Canonical correspondence analysis, CCA)和除趋势典范对应分析(Detrended canonical correspondence analysis, DCCA)。本文从植物群落分布格局、群落结构对环境因子的响应方面阐述排序法在植物群落研究中的现状、存在的问题及解决办法,对未来排序法发展的可能趋势进行了展望。

1 排序法在植物群落与环境因子关系中的应用现状

1.1 排序法在植物群落分布与环境关系中的运用

目前排序法在植物物种分布与环境因子之间的关系研究报道很多,从间接排序中的 CA、DCA、PCA、NMDS 到直接排序中的 RDA、CCA、DCCA,方法的选择趋于多样化;从单一排序法的应用到多种排序法对比分析再到结合数量分类综合研究,排序类型也更为多元化。

1.1.1 单一排序法

Ahmad^[4]为了探究巴基斯坦拉合尔野生公园草本植物在各种环境条件影响下的分布情况,利用 CCA 排序认为土壤水分是决定物种分布的重要因素。Wang 等^[5]通过 PCA 排序认为鄱阳湖湿地土壤总氮、总磷及有机质对植物群落分布影响较大。Hamberg 等^[6]为检验人为踩踏对区域植物群落分布的干预效果,于 2004–2007 年在芬兰南部的万塔、

图苏拉及西普设计踩踏试验,通过 NMDS 分析表明研究区植物对人为踩踏十分敏感。踩踏强度与优势种盖度下降幅度呈反比。每种排序法的运用都需要遵循其特定的数据要求,同时由于其自身属性限制及运算过程中的误差,排序法本身也有缺陷。直接排序法 CCA 较间接排序法对原始数据要求更为严格,须同时具备样方-物种、样方-环境因子数据,反映的生态学意义直观无需人为推断。但运算过程中每一步的计算结果都要与环境因子进行线性回归处理,在第二排序轴初始坐标的选取上主观性较大,影响收敛的速度;另外第二排序轴多数情况下会受到第一轴的影响发生二次变形,即所谓的“弓形效应”,影响排序精度。相比之下,间接排序法 PCA 运算过程中完全基于物种数据而无需考虑环境因子,在排序图上所反映的生态学梯度较为模糊,需根据经验加以推断。但其注重原始数据中心化(标准化),当样方中的植物种类相差较大时更是如此,不同的中心化(标准化)方法会干扰最终的排序结果。排序法 CCA、PCA 等都是基于样方-物种原始数据矩阵进行排序,而 NMDS 是以样方间相异距离矩阵为起点,在排列过程中尽可能使样方间空间差异与原始距离矩阵保持一致,克服 PCA 在表达生态学意义模糊不清的缺点,但因运算结果与初始值的选取有较大关联,故需要使用者对数据结构比较熟悉。

1.1.2 多种排序方法结合与对比

Ali 等^[7]将 DCA 和 CCA 结合对巴基斯坦北部斯瓦特地区植被进行多元统计分析 & 植被制图, DCA 分析表明矮生欧洲紫杉(*Taxus baccata*)与长叶云杉(*Picea smithiana*)、雪松(*Cedrus deodara*)、冷杉(*Abies fabri*)等乔木物种关联性较低,金合欢(*Acacia farnesiana*)、尖叶木樨榄(*Olea cuspidata*)、楝树(*Melia azedarach*)和桉树(*Eucalyptus robusta*)位于排序图左边,物种生存环境相似;CCA 排序结果表明乔木物种分布与水质等呈正相关关系。Fenu 等^[8]以地中海盆地为例,用 DCA、NMDS 和 CCA 对比分析沿海地区环境对植物群落分布的影响,3 种方法的分析结果无明显差别,均显示土壤有机质和风蚀作用对植被影响最大;间接排序法 DCA 虽然在揭示植物群落、环境二者关系时的生态学意义较为模糊,但在运算过程中将第一排序轴分成若干长度相等的区间,对每一区间内第二排序轴的坐标值进行中心化,克服了“弓形效应”的影响;与之相反,CCA 能够直观地通过排序轴反映环境对物种分布

的影响,但却无法克服“弓形效应”带来的精度误差;二者结合能够更加精准、直观地揭示物种分布与环境之间的关系;相比之下,NMDS 较 DCA、CCA 在群落类型界定上更加清晰,三者结合不仅可以直观揭示植物群落分布与环境之间关系,又能将相似的植物群落聚在一起,使组内群落相近,组间群落相异。

1.1.3 排序法与数量分类法结合

Khan 等^[9]利用双向指示种分析(TWINSPAN)、Ward 聚类法及 DCA、PCA 排序法综合探讨巴基斯坦奇特拉尔县原始森林植物群落分布与环境之间的关系,TWINSPAN 的划分结果与 Ward 聚类法的分类一致,可将研究区植物群落划分为 6 个群落类型;地形因子中的高程、坡度对植物群落分布影响较大,而土壤中的 Mg^{2+} 、 K^{+} 等的影响较小。Raja 等^[10]将 TWINSPAN、分层聚类和 DCA 排序法结合对巴基斯坦温带湿润森林植被进行多元统计分析,结果表明研究区植被可分成 4 个群落类型,土壤 P 元素和高程对植被分布及群落结构的影响显著。类似的研究还应用在湖泊湿地^[11-13]、山地^[14-16]、河岸带^[17-18]等。

植物群落数量分类是依植物群落相似性将其划分为若干组,使组内群落尽量相似,组间群落差异性尽可能明显,客观划分群落类型,反映一定的生态学规律;排序法将样方或物种数据沿一定生态学梯度通过排序图表现出来,直接或间接地揭示环境因子与物种分布之间的关系,二者结合在界定群落类型的同时赋予物种分布明确的生态学意义。

1.1.4 排序法与地理信息系统(GIS)的结合

朱晓勤^[19]为探讨秦岭山地植物群落分布与环境因子的关系,将数量分析方法和 GIS 技术结合进行对比研究,通过统计分析形成相应的植物群落空间分布图,将 1:5 万经栅格化和插值化后形成的高程分布图(以海拔为例)与栅格化后的 1:25 万植被分布图进行叠加,以每一梯度级为基础,统计每种植物落入该高程梯度级内的数量;据此进行曲线制图,描述该植物在不同海拔梯度级上的分布状况,定量分析植被随海拔梯度变化呈现的分布规律,植被分布变化情况与降水量、温度、坡度等的关系分析处理方法相同;结果表明海拔对植被分布影响最大,CCA 排序分析显示温度、海拔是控制植物分布的关键因子,进一步证实了 GIS 技术的研究结论。Fan 等^[20]在分析黄河三角洲地区地下水位和土壤盐分对植物群落分布的影响时,首先,用 DCCA 排序法揭示野外试验调查的植物群落分布与实际测量

环境因子之间的关系,结果表明土壤盐分和地下水位对物种分布影响较大;其次,用 ArcGIS 绘制研究区潜在的植被物种及群落分布图(具体是使用二进制的栅格图层,物种存在记为 1,不存在记为 0,将这些栅格图层进行叠加获取新的图层信息);最后,将潜在的与实际的植被分布图进行对比,观察所发生的变化,解释其变化的机理。GIS 具有空间数据存储、管理与分析功能,将其与数量生态学方法结合研究植物群落分布与环境因子之间的关系,可以满足现代生态学研究大量而复杂的空间信息要求,在更大尺度生态系统的研究上具有重要意义。

运用排序法解决植物群落分布与环境因子关系问题时,往往冗余变量(对植物群落影响不明显的环境变量)、环境因子间的交互作用会对排序结果产生干扰,对此可用以下两种方法加以解决:① 环境因子预选功能和偏蒙特卡洛置换检验(Partial monte carlo permutation test)。用环境因子预选功能和偏蒙特卡洛置换检验评估每个备选的环境变量对解释物种的贡献,将在统计意义上显著相关的变量选入进行后续排序工作,间接增强排序效果。武小钢等^[21]在探究长治城市湿地公园滨岸区植物群落特征及其与土壤环境的关系时,用 Monte-Carlo 显著性检验找出对研究区物种分布有较大贡献的土壤总氮和含水量,并根据物种与土壤氮含量和水分含量的多重回归关系绘制 t -value 双序图,进一步考察两个因子对物种分布的影响。② 偏典范对应分析(Partial canonical correspondence analysis, PCCA)。PCCA 可以考察不同因子对物种分布差异的解释率,包括因子之间交互作用的贡献率。余敏等^[22]通过 CCA 排序表明土壤养分、坡度、坡向是控制山西灵空山小蛇沟林下草本层植物群落物种分布的关键因子;PCCA 分析结果显示生境因子与生物因子解释了物种格局变化的 42.9%,其中生境因子占 31.8%,生物因子占 7.9%,生境因子与生物因子交互作用部分占 3.2%。

1.2 排序法在植物群落物种多样性方面的应用

排序法不仅在植物群落分布方面应用广泛,在揭示植物群落物种多样性与环境因子关系上也发挥重要作用。其应用过程依排序类型不同出现差异:间接排序法中将各样地多样性指数标识在排序图上,根据样地在图上的位置间接推断环境因素对物种多样性带来的影响;直接排序法中可在样地-环

境因子矩阵中加入物种多样性指数, 将其视为环境因子, 通过环境因子与多样性指数箭头与原点连线夹角判断二者的关系。

间接排序法 Harvolk 等^[23]以德国联邦水域为例, 研究人为干扰对重度整修后河流形成的冲积平原植被生物多样性的影响, 用NMDS划分群落类型, 结合PCCA分析多样性指数、植被分布与环境因子的关系; 结果表明人为干扰是影响研究区物种分布和生物多样性变化的重要因素。贺强等^[24]对水盐梯度下黄河三角洲湿地植被空间分异规律进行定量分析, 分别计算了研究区30个样地修正后的Gini-Simpson多样性指数, 并将指数划分为5个等级, 利用模糊数学排序揭示多样性指数与环境之间的关系, 结果表明, 低水深、高盐分(排序图右下部)和高水深、低盐分处(排序图的左上部)多样性指数较低, 处于水生和旱生、盐生和非盐生植物群落的过渡地区(排序图中部)多样性指数最高。

直接排序法 Suchrow 等^[25]用DCCA探讨德国北海盐沼植被物种分布随高程的变化情况; 结果显示物种丰富度指数与植被分布随高程变化波动较大。与此类似的研究还出现在伊朗厄尔布尔士山脉^[26]、大西洋河漫滩草地^[27]、喜马拉雅山脉^[28]、喀纳斯国家自然保护区^[29]、宁夏盐池县^[30]等地。

相比以往传统的相关分析^[31]、线性回归^[32]表达植物物种多样性与环境之间的关系, 排序法的应用更为直观。首先, 由间接排序法得到的排序图, 各样地或植物群落多样性指数随排序轴在图上的变化趋势能够推断出导致发生变化的关键因子; 其次, 由直接排序法得到的排序图, 通过环境因子箭头与排序轴原点连线长短即可判断出控制植物物种多样性发生变化的主要因子。

2 目前排序法应用存在的问题

2.1 计算过程的可能偏差

数据中心化和标准化问题 多数排序法运算过程中都要求对原始数据进行中心化或标准化处理, 当样地中的物种组成差别较大时, 更是如此。中心化包括物种中心化、样地中心化以及两者同时中心化, 物种中心化是将物种*i*在第*j*个样方中的原始数据减去物种*i*在所有样方中的原始数据的平均值; 样地中心化则通过样地*j*中物种*i*的原始数据减去样地*j*中所有种类的平均值; 两者同

时中心化则对上述二者同时进行处理^[2]。中心化方法的选择一般依赖于原始数据, 当较多物种仅出现在少数样地时, 采用物种中心化会将原本在该样地未出现的物种也赋予一定权重值, 计算结果偏差, 这种情况不做物种中心化反而效果会更好; 相反, 若采集的物种数据基本涵盖了所有调查样方, 此时物种中心化是必要的。当环境因子指标量纲不同时, 通常情况下需要对原始数据进行标准化处理减少精度误差, 不同的标准化方法也会影响最终的排序结果。

“弓形效应”问题 CA、CCA 运算过程中第二排序轴会受到第一轴带来的弓形效应的干扰。用DCA将第一排序轴分成几个长度相等的区间, 每一区间内对第二轴的坐标值进行中心化, 即将某样方或种类在第二轴上坐标值的平均值减去该样方或种类所在区间内全部样方或种类在第二轴上坐标值的平均值, 可克服“弓形效应”^[2]。

2.2 排序法在植物群落物种多样性方面的应用略显单薄

目前应用排序法解决植物群落物种多样性与环境关系问题时大都是在研究物种分布基础上进行的, 这一方面可能是传统统计学方法中的相关分析、线性回归等在解决二者关系时已经能够满足大多数学者的需求。谭向峰等^[33]用相关分析探讨黄河三角洲滨海草甸植物群落多样性与土壤因子关系, 认为67个调查样方中的Shannon-Wiener多样性指数(*H'*)和Simpson多样性指数(*D*)与电导率(EC)、速效钾(AK)和速效磷(AP)呈极显著负相关($P < 0.01$), 与pH值呈显著正相关($P < 0.05$), 表明上述土壤因子均对研究区植物群落多样性变化起控制作用; 另一方面, 排序的最终目的是通过样方或物种在排序图上的分布找出其所反映的生态学规律, 因此, 较多学者习惯利用排序图揭示植被分布与环境之间的关系, 而对物种多样性方面的研究倾向于另辟蹊径。实际上, 用排序法解决植物群落物种多样性与环境关系问题具有一般统计学方法不具备的优势, 在反映二者关系时较一般统计学方法(相关分析等)更为直观。间接排序过程中研究区样点多样性指数在图上位置即可反映出相应环境因子梯度变化; 直接排序过程中多样性指数与环境因子关系可通过两种方式来判别: 当二者均用箭头与原点连线表示时, 箭头夹角越小相关性越高, 反之越低, 当只有环境因子用箭头与原点连线表示时, 连线越长影响

越大, 反之影响越小。Mahdavi 等^[26]在研究伊朗厄尔布尔士山脉海拔 3000 m 左右的草原植物物种多样性及生活型时, 将海拔因子、Shannon 多样性指数、Richness 丰富度指数用箭头的形式表达在排序图上, 通过海拔与二者之间的反向夹角推得负相关关系。笔者认为针对排序法在解决该问题时应用较少的情况, 首先, 需要对应用模式进行创新, 由原先结合植被分布共同探讨转变为利用排序法有针对性的进行深入研究, 应用过程中以具体的野外试验为基础, 基于不同采样区域采集相关植被、环境数据, 在同一研究区域结合多种排序方法对比分析, 找出不同排序方法在解决该问题时的优缺点, 在不同研究区域采用同一种排序方法, 确定该方法适合的最佳研究区域; 其次, 基于该问题上最佳排序法所适应的最佳的研究区域, 将其不断的应用到其他类似的研究样点, 加大排序法在解决植被物种多样性与环境关系问题的影响力。

2.3 冗余变量、环境因子交互作用及稀有物种干扰

区域植物群落往往受到诸多环境因子的影响, 如水文、土壤、地形等, 并不是所有的因子都对植物群落分布及多样性起决定性作用, 若在排序过程中将这些因子考虑进去往往会干扰排序结果。排序之前可以对因子进行预选和显著性检验, 筛选出对植被影响较大的若干因素。有时环境因子存在空间上的相互作用, 交互作用对植物群落产生的影响很多情况下会被研究者忽略, PCCA 分析不仅能够给出因子单独的解释贡献率, 对于因子间交互作用给植物群落带来的影响也能够给予客观量化。稀有种是指由人类活动偶然带入或由环境改变而入侵到群落中的物种, 也可能是群落中衰退的残留种, 其存在一般也会影响排序结果, 可以考虑通过降低稀有种的权重来提高具有生态学指示意义的物种权重, 间接提高排序结果的意义。

3 展望

排序法作为数量分类与排序的一部分, 已有近 40 年的发展历史, 无论方法自身还是应用领域都日渐成熟, 已成为当今植物群落分析研究中必不可少的技术。

3.1 方法选择上从单一走向多元

各种排序法都具有自身的优点和缺陷, 多种排

序法的使用以及基于数量分类基础上的排序能取长补短, 特别是直接排序法与间接排序法的结合将被越来越多学者青睐。Ali 等^[7]在利用多元统计方法研究巴基斯坦北部斯瓦特地区植被分布时, 用 DCA 划分植物群落类型, 将处在排序图右上角的欧洲紫杉与其他物种区别开来, 而处于欧洲紫杉下部的长叶云杉和冷杉根据其物种相似性划分为一类; CCA 分析表明植被分布与人为水质因子之间具有正相关关系。两种方法的结合既界定了研究区植物群落类型又对群落物种分布与环境关系给出直观定义。此外, 基于数量分类基础的排序也将是今后应用的亮点, TWINSpan、分层聚类法及 Ward 聚类法等数量分类手段根据植物群落或样地之间的相似性而划分为不同的类型, 不仅能与 DCA 等间接排序法结果进行对比分析, 同时能进一步探讨物种分布对环境的响应。

3.2 排序法在植物物种多样性方面的研究将日益增多

目前对于植物物种多样性与环境因子关系研究, 方法上过于依赖传统统计学中的相关分析和线性回归等, 而应用排序法的研究报道较少。实际上排序法在解决二者关系时更为灵活直观, 仅通过环境因子与物种多样性指数箭头方向即可判断出二者之间的关系以及指数随因子变化所呈现的相应规律。今后研究者应转变思路, 先以传统方法为主、排序法为辅二者结合对比分析, 进而转向仅利用排序法有针对性地解决二者之间的关系。

3.3 注重与 GIS、RS 技术的结合

随着遥感影像时空分辨率的提高、GIS 空间分析能力的发展, 二者与排序法结合共同探讨物种分布与环境之间的关系越来越成为一种趋势。Ababou 等^[34]在分析阿尔及利亚盐度较低的 Chelif 盆地骆驼蓬(*Peganum harmala*)的空间分布格局时, 用 GIS 技术通过克里金插值法绘制骆驼蓬在研究区中的分布图, 表明该植物仅出现在研究区的西北及西南部; 利用 RDA 对研究区 141 个样点及 9 个土壤因子进行排序, 结果表明土壤电导率和土壤构造是影响植物分布的重要环境因子; 克里金插值法虽然能清晰给出物种分布情况, 但导致物种在研究区不同区域分布的原因需要间接推断, 无法与 RDA 分析得出的结论进行对比验证。笔者认为, 今后在利用 GIS

技术绘制植物分布图的同时还应对所获取的环境因子进行空间插值,继而与栅格化后的植被分布图进行空间叠加,分析物种分布与环境之间的关系,并与排序法所得结果进行对比分析。

参考文献

- [1] HE Q, CUI B S, ZHAO X S, et al. Relationships between salt marsh vegetation distribution/diversity and soil chemical factors in the Yellow River Estuary, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, 29(2): 676–687. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2009.02.016.
贺强, 崔保山, 赵欣胜, 等. 黄河河口盐沼植被分布、多样性与土壤化学因子的相关关系 [J]. *生态学报*, 2009, 29(2): 676–687. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2009.02.016.
- [2] ZHANG J T. Quantitative Ecology [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2011: 2–159.
张金屯. 数量生态学 [M]. 第2版. 北京: 科学出版社, 2011: 2–159.
- [3] ZHANG J T. Quantitative Ecology [M]. Beijing: Science Press, 2004: 131–132.
张金屯. 数量生态学 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 131–132.
- [4] AHMAD S S, EHSAN H. Analysing the herbaceous flora of Lohi Bher Wild Life Park under environmental stress [J]. *Pak J Bot*, 2012, 44(1): 11–14.
- [5] WANG X L, HAN J Y, XU L G, et al. Soil characteristics in relation to vegetation communities in the wetlands of Poyang Lake, China [J]. *Wetlands*, 2014, 34(4): 829–839. doi: 10.1007/s13157-014-0546-x.
- [6] HAMBERG L, MALMIVAARA-LÄMSÄ M, LEHVÄVIRTA S, et al. Quantifying the effects of trampling and habitat edges on forest understory vegetation: A field experiment [J]. *J Environ Manag*, 2010, 91(9): 1811–1820. doi: 10.1016/j.jenvman.2010.04.003.
- [7] ALI K, KHAN N, RAHMAN I U, et al. Multivariate analysis and vegetation mapping of district swat, northern Pakistan [J]. *Inter J Adv Res*, 2015, 3(6): 990–1006.
- [8] FENU G, CARBONI M, ACOSTA A T R, et al. Environmental factors influencing coastal vegetation pattern: New insights from the Mediterranean Basin [J]. *Folia Geobot*, 2013, 48(4): 493–508. doi: 10.1007/s12224-012-9141-1.
- [9] KHAN N, SHAUKAT S S, AHMED M, et al. Vegetation-environment relationships in the forests of Chitral district Hindukush range of Pakistan [J]. *J For Res*, 2013, 24(2): 205–216. doi: 10.1007/s11676-013-0346-9.
- [10] RAJA R, BOKHARI T Z, YOUNIS U, et al. Multivariate analysis of vegetation in wet temperate forests of Pakistan [J]. *J Pharm Biol Sci*, 2014, 9(1): 54–59. doi: 10.9790/3008-09165459.
- [11] ZHANG G S, WANG R Q. Quantitative classification of plant communities in the modern Yellow River Delta [J]. *J Beijing For Univ*, 2008, 30(3): 31–36. doi: 10.3321/j.issn:1000-1522.2008.03.006.
张高生, 王仁卿. 现代黄河三角洲植物群落数量分类研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2008, 30(3): 31–36. doi: 10.3321/j.issn:1000-1522.2008.03.006.
- [12] WANG H L, ZHANG H G, LÜ G H. Quantitative classification and ordination of plant communities in Ebinur Lake Wetland [J]. *J Arid Land Resour Environ*, 2013, 27(3): 177–181.
王合玲, 张辉国, 吕光辉. 艾比湖湿地植物群落数量分类和排序 [J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(3): 177–181.
- [13] NING Y, ZHANG Z X, CUI L J, et al. Vegetation composition of Momoge wetland and its implications for succession in alkaline wetland [J]. *J Beijing For Univ*, 2014, 36(6): 1–8. doi: 10.13332/j.cnki.jbfu.2014.06.007.
宁宇, 张志翔, 崔丽娟, 等. 莫莫格湿地植被结构研究及其对碱性湿地演替的启示 [J]. *北京林业大学学报*, 2014, 36(6): 1–8. doi: 10.13332/j.cnki.jbfu.2014.06.007.
- [14] XU B, ZHANG J T, YANG H X, et al. Quantitative analysis of plant communities in Baihua Mountains, western Beijing [J]. *J Beijing Norm Univ (Nat Sci)*, 2006, 42(1): 90–94. doi: 10.3321/j.issn:0476-0301.2006.01.021.
许彬, 张金屯, 杨洪晓, 等. 京西百花山植物群落数量分析 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2006, 42(1): 90–94. doi: 10.3321/j.issn:0476-0301.2006.01.021.
- [15] REN B B, LI S H, ZHU C Y, et al. Numerical classification and ordination of forest vegetation communities in Yushan Mountain, Changshu [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci)*, 2010, 34(3): 45–50. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2010.03.010.
任斌斌, 李树华, 朱春阳, 等. 常熟虞山森林植被群落数量分类与排序 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2010, 34(3): 45–50. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2010.03.010.
- [16] ZHENG J G, DONG D P, ZHAO D H, et al. Relationship between vegetation community characteristics and its environmental factors in the west slope of Helan Mountain [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, 28(9): 4559–4567. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2008.09.058.
郑敬刚, 董东平, 赵登海, 等. 贺兰山西坡植被群落特征及其与环境因子的关系 [J]. *生态学报*, 2008, 28(9): 4559–4567. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2008.09.058.
- [17] LIU Y Z, ZHANG Z F, CAI Q Y, et al. Structure and composition of riparian vegetation in Gan River [J]. *Resour Environ Yangtze Basin*, 2014, 23(7): 923–929. doi: 10.1870/cjlyzyyhj201407005.
刘以珍, 张祖芳, 蔡奇英, 等. 赣江河岸带植被的数量分析 [J]. 长

- 江流域资源与环境, 2014, 23(7): 923–929. doi: 10.1870/cjlyzyyhj201407005.
- [18] GAO W, YE G F, LU C Y, et al. Quantitative classification and sequence of Feng-shui forest in coastal zone of Dongshan Island in Fujian [J]. J CS Univ For Techn, 2013, 33(8): 117–121.
- 高伟, 叶功富, 卢昌义, 等. 福建东山岛海岸带风水林数量分类与排序 [J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(8): 117–121.
- [19] ZHU X Q. GIS-based analysis on vegetation-environment gradient correlation in Qinling Mountain [D]. Xi'an: Northwest University, 2007: 1–74.
- 朱晓勤. 基于 GIS 的秦岭山地植被分布与环境梯度关系分析 [D]. 西安: 西北大学, 2007: 1–74.
- [20] FAN X M, PEDROLI B, LIU G H, et al. Potential plant species distribution in the Yellow River Delta under the influence of groundwater level and soil salinity [J]. Ecohydrology, 2011, 4(6): 744–756. doi: 10.1002/eco.164.
- [21] WU X G, YANG X Y, BIAN J, et al. Species composition and soil gradient analysis of plant communities in the waterside zone of Changzhi National Urban Wetlands Park [J]. Acta Ecol Sin, 2015, 35(7): 2048–2056. doi: 10.5846/stxb201405201036.
- 武小钢, 杨秀云, 边俊, 等. 长治城市湿地公园滨岸区植物群落特征及其与土壤环境的关系 [J]. 生态学报, 2015, 35(7): 2048–2056. doi: 10.5846/stxb201405201036.
- [22] YU M, ZHOU Z Y, KANG F F, et al. Gradient analysis and environmental interpretation of understory herb-layer communities in Xiaoshengou of Lingkong Mountain, Shanxi, China [J]. Chin J Plant Ecol, 2013, 37(5): 373–383. doi: 10.3724/SP.J.1258.2013.00039.
- 余敏, 周志勇, 康峰峰, 等. 山西灵空山小蛇沟林下草本层植物群落梯度分析及环境解释 [J]. 植物生态学报, 2013, 37(5): 373–383. doi: 10.3724/SP.J.1258.2013.00039.
- [23] HARVOLK S, SYMMANK L, SUNDERMEIER A, et al. Human impact on plant biodiversity in functional floodplains of heavily modified rivers: A comparative study along German federal waterways [J]. Ecol Eng, 2015, 84: 463–475. doi: 10.1016/j.ecoleng.2015.09.019.
- [24] HE Q, CUI B S, ZHAO X S, et al. Vegetation distribution patterns to the gradients of water depth and soil salinity in wetlands of Yellow River Delta, China [J]. Wetland Sci, 2007, 5(3): 208–214. doi: 10.3969/j.issn.1672-5948.2007.03.003.
- 贺强, 崔保山, 赵欣胜, 等. 水盐梯度下黄河三角洲湿地植被空间分异规律的定量分析 [J]. 湿地科学, 2007, 5(3): 208–214. doi: 10.3969/j.issn.1672-5948.2007.03.003.
- [25] SUCHROW S, JENSEN K. Plant species responses to an elevational gradient in German north sea salt marshes [J]. Wetlands, 2010, 30(4): 735–746. doi: 10.1007/s13157-010-0073-3.
- [26] MAHDAVI P, AKHANI H, van der MAAREL E. Species diversity and life-form patterns in steppe vegetation along a 3000 m altitudinal gradient in the Alborz Mountains, Iran [J]. Folia Geobot, 2013, 48(1): 7–22. doi: 10.1007/s12224-012-9133-1.
- [27] MAHER C, SKEFFINGTON M S, GORMALLY M. Hydroperiod and traditional farming practices drive plant community composition on unregulated Atlantic floodplain meadows [J]. Wetlands, 2015, 35(2): 263–279. doi: 10.1007/s13157-014-0616-0.
- [28] KHAN S M, PAGE S, AHMAD H, et al. Vegetation dynamics in the western Himalayas, diversity indices and climate change [J]. Sci Techn Dev, 2012, 31(3): 232–243.
- [29] LI Y L, YUE M, YANG Y L, et al. Community succession of flood plain wetland plants at north end of Kanas Lake, Xinjiang [J]. Chin J Ecol, 2010, 29(8): 1519–1525.
- 李永亮, 岳明, 杨永林, 等. 新疆喀纳斯湖北端河漫滩湿地植物群落演替 [J]. 生态学杂志, 2010, 29(8): 1519–1525.
- [30] WANG X, SONG N P, YANG X G, et al. Redundancy analysis of soil and vegetation of recovered grassland on abandoned land in the desert steppe [J]. Acta Pratacult Sin, 2014, 23(2): 90–97. doi: 10.11686/cyxb20140211.
- 王兴, 宋乃平, 杨新国, 等. 荒漠草原弃耕恢复草地土壤与植被的 RDA 分析 [J]. 草业学报, 2014, 23(2): 90–97. doi: 10.11686/cyxb20140211.
- [31] ZHANG J Y, ZHOU H R, GAO M. Relationships between plant community characteristic index and soil factors in Alice Lake Wetland [J]. Chin J Ecol, 2007, 26(7): 983–988.
- 张江英, 周华荣, 高梅. 艾里克湖湿地植物群落特征指数与土壤因子的关系 [J]. 生态学杂志, 2007, 26(7): 983–988.
- [32] ZHAO R F, ZHOU H R, QIAN Y B, et al. Interrelations between plant communities and environmental factors of wetlands and surrounding lands in mid- and lower reaches of Tarim River [J]. Chin J Appl Ecol, 2006, 17(6): 955–960.
- 赵锐锋, 周华荣, 钱亦兵, 等. 塔里木河中下游湿地及周边植物群落与环境因子的关系初探 [J]. 应用生态学报, 2006, 17(6): 955–960.
- [33] TAN X F, DU N, GE X L, et al. Relationships between coastal meadow distribution and soil characteristics in the Yellow River Delta [J]. Acta Ecol Sin, 2012, 32(19): 5998–6005. doi: 10.5846/stxb201108271252.
- 谭向峰, 杜宁, 葛秀丽, 等. 黄河三角洲滨海草甸与土壤因子的关系 [J]. 生态学报, 2012, 32(19): 5998–6005. doi: 10.5846/stxb201108271252.
- [34] ABABOU A, CHOUIEB M, BOUTHIBA A, et al. Spatial pattern analysis of *Peganum harmala* on the salted lower Chelif Plain, Algeria [J]. Turk J Bot, 2013, 37(1): 111–121. doi: 10.3906/bot-1202-16.