

森林生态系统中草层植物的生态功能

蔡锡安 夏汉平*

(中国科学院华南植物研究所, 广东 广州 510650)

摘要: 综述了过去 20 年国内外有关森林生态系统中草层植物的生态功能研究。森林生态系统中的草层植物是指活的草本类植物及在一定高度(通常 40 cm)以下的乔灌木幼苗的总和, 它和枯落物以及林下土壤共同构成森林生态系统中的林下层亚生态系统。森林生态系统中的草层植物具有明显增加生物多样性、防止水土流失、改良土壤结构、保持和提高土壤肥力、促进林木生长、改善林地小气候、加速生态恢复等方面的功效, 其功能是相当强大且多种多样的。我国南亚热带森林生态系统中的草层植物研究应在以下方面进一步加强: 1) 草层植物与枯落物各自的生态功能与生态效益; 2) 人工林下的草层植物发生与演替规律; 3) 林下幼苗的更新演替规律; 4) 草层植物在复合农林业生态系统中的生态功能及其机理; 5) 加强草层植物的良种的选育和应用研究等。

关键词: 草层植物; 森林生态系统; 生态功能; 枯落物

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2003)01-0067-08

Ecological Functions of Herbaceous Layer in Forest Ecosystem

CAI Xi-an XIA Han-ping*

(South China Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

Abstract: Study on ecological functions of the herbaceous layer in forest ecosystem conducted in the last two decades is reviewed. The concept of herbaceous layer in forest ecosystem is defined as living grasses and forbs, and tree seedlings usually lower than 40 cm. Herbaceous layer, together with litter, and ambient soil constitutes an understory sub-ecosystem. Herbaceous layer has been reported to have a lot of ecological functions, such as increasing ecosystem diversity, preventing water and soil loss, enhancing soil nutrition, amending soil structure, improving seedling growth, improving microclimate, and accelerating ecological restoration. However, there are several aspects that should be paid more attention in the study on herb layer in the low subtropical forest ecosystem, e. g. 1) ecological functions and benefits of herbaceous layer or litter; 2) the colonization and succession of herbaceous layer in understory of artificial forests; 3) mechanism of seedling renovation in the forest; 4) the eco-functions and mechanisms of herbaceous layer in agroforestry ecosystem; 5) screening for more excellent herbaceous species.

Key words: Herbaceous layer; Forest ecosystem; Ecological functions; Litter

1 草坡与草层植物的概念

热带亚热带地区森林群落被采伐后, 往往形成大片以禾本科草类或蕨类植物占优势的草丛或灌草丛。如果这些地方经常性遭受火或人为收割等的干扰, 它就能保持一定的稳定性, 形成所谓的偏途顶极(disturbance climax)。但一旦这些干扰停止, 阳

性乔灌木树种就会逐渐侵入, 若干年后发展成为灌丛, 并向森林方向发展。因此, 有人将这种草丛或灌草丛称之为热带亚热带草丛, 并认为这是热带亚热带森林群落发展过程中的一个演替阶段^[1]。有人则不承认这是一个演替阶段, 因为有灌木杂生其中, 所以称为稀树草坡或灌草丛^[2]。还有学者认为这属于草甸的性质^[3], 或泛称为草坡、草地、草山等^[4-7]。目前没有一个公认的定义, 其中最有争议的是它的演替性质, 即草坡或草丛是否属于一个演替阶段。

从植物群落演替和形成发展过程来判断, 热带

收稿日期: 2002-04-27 接受日期: 2002-07-29

基金项目: 广东自然科学基金团队项目(003031); 中国科学院
鹤山丘陵综合开放试验站开放基金资助项目

* 通讯作者 Corresponding author

亚热带的草坡多是常绿阔叶林遭破坏后,尤其是连续火烧后偏途演替的结果。一般说它是次生性的植被,但具有一定的稳定性。徐祥浩把草坡定义为“华南地区对荒山草本植物群落的通称”^[4],并解释草坡是丘陵地中,以中生或旱中生的多年生禾本科草本植物及芒萁(*Dicranopteris pedata*)为主的植物群落,具有热带和亚热带的种类成分,并具有较多的常绿灌木,除了可能散生马尾松(*Pinus massoniana*)外,少有乔木的生长。显然,草坡与热带草原不同,热带草原是水热条件下的产物,是一种气候顶极群落,是一个演替阶段^[3,4],而草坡是森林破坏后形成的,是干扰形成的产物。多数学者认为它不是一个演替阶段,而是一个演替过渡阶段^[4,5]。

对于森林群落内部的林下草层植物,也由于不同的森林、不同的演替阶段,其结构和功能各不相同,因而有不同的叫法,但没有草坡的概念那么杂乱,基本上称之为草本层、草层或草层植物。但是,它的问题在于定义的外延不清,有人认为草本层指林下植被中的草类植物^[6];有人则把草类植物和一定高度下的乔、灌木树种的幼苗及枯枝落叶物统称为地被层^[9]。

本文把森林生态系统中活的草本类植物及在

一定高度(通常 40 cm)以下的乔灌木幼苗,统称为草层植物;而乔灌木的凋落物及草本植物的枯枝落叶等称为林下死地被物层。草层植物、枯落物以及林下土壤共同构成森林生态系统中的林下层亚生态系统。

2 草层植物的生态功能研究

2.1 研究概况

草层植物是森林生态系统中最重要层次与组分之一,因此,有关草层植物的研究内容通常与森林生态系统的相适应,主要有生物多样性、群落演替动态、生理生态功能以及维持森林生态系统的可持续发展方面所起的作用等。20 世纪 80 年代以前,草层植物研究工作多集中在基础研究方面。近 20 年来,基础研究与应用研究并重发展,其中基础研究主要有群落演替动态、生产力(光合生态、水分生态等)、生物地球化学特征、生物多样性等,应用研究主要是草层植物的利用和改良研究、生态工程以及草层植物作用下的森林生态系统健康与可持续发展等(图 1)。显然,基础研究与应用研究之间是相辅相承的。

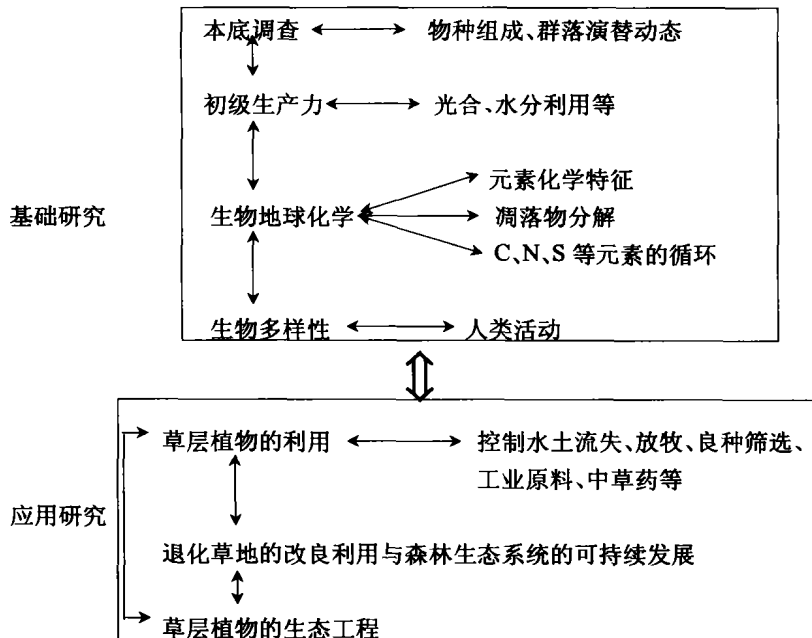


图 1 草层植物生态功能研究概况(引自文献[10],有所改动)

Fig. 1 Outline of study on functions of plants in herbaceous layer (Cited from reference [10], with modification)

2.2 在生态恢复中的作用

矿区和垃圾场等受损的生态系统由于其生态环境条件特别恶劣,动植物很难实现自然定居。但

草本植物由于根系浅,抗逆性强,且很多已被证实具有耐重金属或有机污染物的特殊机制,因此能逐渐适应这类恶劣生境并能成功定居^[11,12]。例如,在湖

北铜绿山古铜矿冶炼渣场形成的自然植被中共有 28 种植物, 其中 27 种是草本植物^[13]。又如, 在粤北仁化铅锌矿的尾矿上, 自然恢复的 10 种植物中有 7 种是草本植物^[14]。可见草本植物在矿渣区的植被恢复中起着重要的作用。草本植物在重金属毒性较高的废弃地上能成功定居, 主要有 3 种生态对策: 耐性对策、微生境对策和根茎对策。耐性对策是指植物种类本身对重金属等恶劣的生境有耐性机制, 如海州香薷(*Elsholtzia haichowensis*)、鸭跖草(*Commelina communis*) 等对 Cu 重金属有较高的耐性。狗牙根(*Cynodon dactylon*)、狗尾草(*Setaria viridis*) 一般定居于先锋植物的枯枝落叶、动物粪便或是人为干扰形成的营养状况较好、重金属毒性较低的微生境中, 这些植物本身不具有重金属耐性, 因而称之为微生境对策。白茅(*Imperata cylindrica* var. *major*) 等的根茎发达, 通过根茎的延伸, 其营养繁殖后代能在纯矿渣上生长, 而形成优势度高的植物种群, 其对重金属的耐性并不很高, 因而称为根茎对策^[15-17]。

实际上, 草类植物在恶劣生境如采矿地、工业污染区、垃圾堆放场等环境的自然定居过程就是一个原生演替过程。按照生态系统演替规律, 条件恶劣的地区往往一年生草类先定居, 然后是多年生草类和灌木, 待水分和养分条件改善后, 以乔木为主体的森林才发展起来。选择性种植先锋草类植物就能达到加速生态系统演替的进程, 从而达到加速植被重建的目的。草本植物与环境在长期的相互作用中形成了具有适应恶劣生境、生活周期长、繁殖系数高等特点, 因而是恢复植被、改善生态环境条件的先锋物种。因此, 筛选具有特殊耐性的草类植物种进行受损生态系统早期的恢复能更有效地进行人工植被恢复。

2.3 水土保持功能

实际上, 人们很早就发现, 草层植物能有效地涵养水源, 防止水土流失。据夏汉平等的试验表明^[24], 香根草绿篱能减少 60% 的径流量和 93% 的土壤侵蚀量。丁朝华等对长江三峡库区的水土保持研究表明, 草本植被覆盖地比农荒地减少径流量 37.5%, 减少冲刷 47.2%^[22]。根据黄土高原水土流失区测定资料, 农田比草地的水土流失量高 40-100 倍, 种草的坡地与不种草的坡地相比, 地表径流量可减少 47%, 冲刷量减少 77%^[47]。草地防止水土流失的能力明显高于单一的灌丛和林地, 3-8 年生的林地拦蓄地表径流的能力为 34%, 而生长两年的草地则为 54%, 高于林地 20%。草地和林地减少径流中的含沙

量分别为 70.3% 和 37.3%。草地拦蓄径流量和减少含沙量的能力也比林地分别高 58% 和 88.5%^[47]。据张永才等^[64]的研究, 在 30° 土坡种植狗牙根草坪的盖度为 100%、80%、60%、40%、20% 时, 在 25 mm h⁻¹ 的人工降雨强度下, 土壤的侵蚀度分别为 0、21%、44%、65%、98%, 可见随着草坪盖度的增加, 土壤侵蚀度锐减(图 2)。

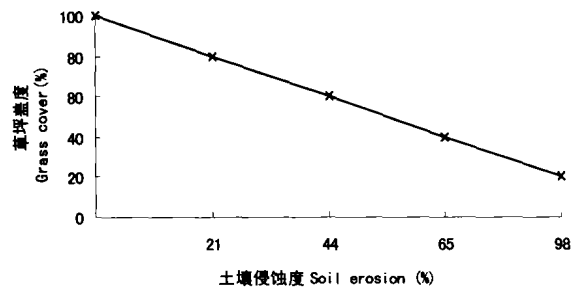


图 2 土壤侵蚀度与草坪盖度之间的关系^[64]
Fig. 2 The relationship of soil erosion and grass cover
(Cited from reference [64])

然而, 仅靠单一的草本层或草本植物在某些情况下对防治水土流失的效果也不是最佳的。例如, 程序等人的研究表明, 在降雨量为 346 mm 时, 若林地土壤冲刷量记为 1, 则草地为 1.2, 农田为 19.5, 休闲裸地为 112.5^[25]。土壤表面特征和植被对地表径流和土壤侵蚀有重要的影响, 在过度放牧区只有草覆盖的、鹅卵石的或砂质的土壤中, 容易产生径流和土壤侵蚀。相反, 树木覆盖度百分比大, 结构稳定和有机含量高的林地可减少径流和土壤侵蚀^[26]。

森林植被具有强大的水土保持功效, 但人工林可能并非都如此, 特别是在造林初期, 林下的草层植物与枯落物层还未形成, 人工林的水土保持效果较差, 在某些情况下甚至有可能加剧水土流失和山体滑坡^[18-21]。人工林种植几年之后, 随林下草本植物的入侵和密度的增大, 以及枯枝落叶层的逐渐形成, 其水土保持效果才明显增强。草层植物的水土保持效果在不同的环境条件下表现不同, 复层结构的植被类型水土保持效果较好, 这主要由于乔木、灌木、草本及藤本植物等多层次、多种类的结构格局, 且有深厚的枯枝落叶层和土壤腐殖质层以及林下具有发达的根系, 因此森林植被的水土保持作用也相应地具有多层性。树冠部分的保护伞作用, 灌木、草本及枯枝落叶的地表覆盖, 海绵状表土保护幕以及地下根系的网络固土作用, 产生了截留雨水、分散雨量、降低雨滴冲击力、分散地面径流、降

低流速、提高渗透速度、增加入渗量等水土保持效应。有研究表明,在相近条件下封山后自然生长起来的灌草植被比 30 年生的人工侧柏林和人工油松林的水土保持效果要好^[23]。在实践中,如今已有不少采用林、灌、草结合建植多层次复合结构的水土保持成功模式。如“香根草生态工程”,就是一种以香根草为纽带,乔、灌、草、藤多层配置用于水土保持与生态恢复的生态工程措施^[27,28]。

大量的研究和实践表明,在不同的生态条件下,适宜的植被类型,才能达到高效益的保持水土的目的。由于长期水土流失形成的瘠薄荒山荒地,封山保育草层植物、灌木或人工种植草层植物、灌木远比种植乔木更适宜,其投入比植树造林少,见效快、效果好。所以筛选优良的草种和探索有效的配置措施是利用生物措施治理水土流失研究中最重要课题之一。

2.4 在复合农林生态系统中的作用

在复合农林业生态系统中,林下种草的作用是显而易见的。如杉木-油桐-仙人草模式能较好地提高光能利用和土地利用,其复合农林生态模式的地下根生物量达 12 t hm^{-2} ,比单一模式高 1.20 倍,细根量则高 1.42 倍^[29]。在果园中,选择适当的草种建立果-草生态果园,不仅能提高果园土壤肥力,还可减少果园病虫害的发生,因而有助于果园的健康持续发展。在柑橘-牧草复合系统中,由于牧草的种植,增加了系统生物多样性,使系统内生物与环境、作物与害虫、害虫与天敌都维持在相对平衡状态,减少了害虫种群数量,并使天敌数量增多^[30]。果园种草还能增加土壤的有机质,使土壤肥力逐步改善^[31]。据广东电白县牧草种原种场的试验,同一荔枝园,种草与不种草相比,有机质、氮、磷、钾分别增加 177.27%、141.17%、77.5%、23.53%,pH 由 5.0 提高到 5.2,果树高度增高 17.8%,树冠增大 15.5%^[32]。陈凯等在红壤坡地柑桔等果园种植香根草等草类,果园土壤有机质、全氮、速效氮、速效磷和钾分别增加 44.7%、53.7%、36.2%、34.3%、212.5%,pH 值提高 0.65,土壤容重下降 0.09 t m^{-3} ,孔隙率增加 3.8%,树势明显比不种草的强^[33]。香根草在复合农林业生态系统中之所以能有效提高土壤养分是因为它是根系纵深发达的植物,其庞大的根系能吸收到深层土壤养分,增加对土壤有机碳的输入^[24,27,34]。可见,在复合农林生态系统中,选择适当的草类植物既可保证有效的养分循环效率和土壤肥力的提高,又可防治水土流失、减少病虫害的发生,从而实现促进复合

农林生态系统持续高效发展的目的。

2.5 草树之间的相互作用

迄今,有关森林乔木种群与其林下草本植物相互影响的研究报道还不多,而且多数研究侧重于树对草的影响^[33,36],即从不同角度研究乔木树冠对林下草本植物的光能获取、生物量及多样性等的影响^[37]。如森林、灌木群落中的草类和苔藓大多依赖于长得较高的植物而生存,这对于避开强光照,减少强光的伤害及减少水分的散失有重要的作用。这种局部依靠乔木层或其它高层植物荫蔽而生长的植物,在潮湿热带森林中极为常见,如附生植物与藤本植物等。

草和树之间总是表现为相互抑制或相互促进作用,而且草本植物很多时候是通过化感作用来影响木本植物的。例如,紫羊茅(*Festuca rubra*)枯叶中的苯酚类化合物就能抑制落叶林更新中木本植物的发芽和生长^[38]。草层植物还通过改善森林生态系统中的小气候环境来促进乔灌木的生长发育。在林地和果园中,由于草本植物的存在,下垫面的环境条件得到改善,包括地表温度降低,保水能力增强,相对湿度提高,地表反射率减少等,最终形成了较有利于林木生长的生境。夏汉平等的实验表明,夏天复合果园由于种植了草本植物,其地表温度、20 cm 土温、1.5 m 气温都不同程度地降低 1.2-1.9°C,而 1.5 m 的空气相对湿度则提高 1.7%-4.3%^[24]。

草树之间的相互作用概括起来有 4 个方面: 1)草树不同的资源利用组合模式,能够增加复合农林生态系统中的资源利用效率从而增加其产量^[39]; 2)草树地下部分的竞争,可通过管理控制不同种间的混作来避免^[40-42]; 3)利用草树之间不同的物候期,避开在生长期对资源的竞争而达到互补作用^[43]; 4)树能够积聚周围的营养物质等资源并且对其进行再分配从而影响林冠下的草生长^[44]。应用草树间的这些相互作用关系指导生产实践可解决许多生态问题。例如,运用植物相生相克作用可加强森林的水土保持,Chou 发现铺地狼尾草(*Pennisetum clandestinum*)能抑制杂草生长,并促进针叶林生长,对阔叶树的再生也有相似作用^[45]。

2.6 草层植物与生物多样性

草层植物与生物多样性的关系近年来研究较多,特别对复合生态果园研究较深入。刘德广等^[46]的研究表明,草层植物能增加落叶层和表土层节肢动物的多样性,减少地下害虫的危害。复合农林生态

系统增加草层植物, 能促进系统内植被的演替, 草层植物的物种种群数量的增加, 能形成较稳定的植被类型, 为昆虫、鸟类及哺乳类等动物提供隐身之处、繁殖条件和食物来源, 并对土壤微生物数量及组成产生明显的影响。周广胜^[30]的研究表明, 土壤微生物如细菌、放线菌、真菌数量分别增加 29%、60%、81%, 有时甚至达几倍, 土壤酶活性提高 60%, 并对枯枝落叶的分解、有机质与腐殖质的积累及养循环起到明显的促进作用。

有研究表明, 植被及其残落物对土壤酶活性影响甚大^[48,49]。一般认为发展森林植被可促进枯落物的分解, 增加微生物的种类和数量, 从而提高土壤的酶活性和有效养分的供给, 有利于地力维护。但丁明懋等人却观测到相反的结果, 他们发现马占相思人工纯林随着林龄的增加, 其根瘤数量和生物量反而减少, 而减少的原因之一是由于林下草本和灌木层的生长, 其根系在表土层占据了一定的空间, 影响了马占相思林根系和根瘤的生长^[50]。可见, 林下草本层的有无对土壤微生物的影响很大, 并且随着条件的不同而不同。

草本植物与生物多样性的关系还可从外来种的入侵来体现。近年来的研究表明, 生物入侵可以对个体到生态系统的多个层次和过程产生影响, 这其中草本植物入侵产生的影响最明显。例如, 来自欧洲的禾草已在北美和夏威夷的许多草原占优势, 而且通过提高火灾强度与频率而在许多地区排挤或降低了本地种的丰富度^[51]。外来草种的入侵有的能促进本地树种的生长, 有的却威胁或危害本地树种, 特别在水分等资源缺乏的时候^[52]。外来一年生草类在一定程度上削弱了本地树种的生殖能力^[53,54]。Paylik 等在加利福尼亚草原发现, 一年生本地草种如 *Amsinckia grandiflora* 在历史上曾普遍与多年生本地草种伴生, 但随着外来种的入侵和除草剂的使用, 多年生草种逐渐退出, 而一年生的本地草种增多, 这种转变使本地一年生草种与外来一年生草种产生了更多的资源利用重叠, 在水分利用方面本地草种比外来种显示出竞争的劣势^[54]。

3 建议

过去半个世纪, 科学家们对草本植物与草层植物在森林生态系统中的生态功能做了大量的研究, 特别是在近年, 形成了一股研究热潮, 并已充分证明它在森林生态系统中具有明显的增加生物多样性、防止水土流失、改良土壤结构、保持和提高土壤

肥力、促进林木生长、改善林地小气候等方面的功效, 其作用是相当大且多方面的^[1,4,18,23,31,32]。尽管如此, 有关草层植物的生态功能的研究仍有许多问题还有待进一步探讨。综合前人的研究成果, 笔者认为, 今后还应进一步加强以下几方面的研究。

3.1 弄清草层植物与枯落物各自的生态功能

虽然很多学者都肯定了森林生态系统中草层植物的水土保持功效, 但几乎所有的研究都是将活的草本植物层与死的枯枝落叶层混在一起观测, 所以至今尚不知道草层植物与枯落物各自的水土保持功效与机理, 当然也不清楚到底哪个的水土保持功能更强。同样, 有关草层植物的其他生态功效, 也未将它与枯落物分开探讨。因此, 系统地定量研究林下草层植物与枯落物各自的生态功能与机理及其二者的相互作用是十分必要的, 它对进一步深入揭示森林生态系统的水土保持功效和其他生态功能具有重要的科学意义。

3.2 加强南亚热带森林生态系统中的草层植物研究

目前, 草层植物生态功能研究, 特别是它与乔木层间的相互作用研究大部分集中在干旱或半干旱大草原、稀树草原上, 而在南亚热带森林内的研究还十分少见^[55,56]。我国南亚热带地区被称为是“北回归线上的绿洲”, 这里植被覆盖率很高, 而且几乎各种类型的森林下面都有草层植物, 草山草坡也占有很大的面积。有关这一带森林生态系统动态与功能的研究也做了大量的工作, 并取得了一大批研究成果^[57]。但林下草层植物与草坡的研究还相当缺乏, 已经开展的一些零星研究既不系统也不深入。地处华南地区的广东省, 在 20 世纪 80 年代初期率先开展对宜林荒山的造林绿化工程, 人工林在全省森林面积中占了很大的比例, 尤其是在南亚热带的丘陵地区。人工林在演替发展过程中, 阴生性树种和草类等逐渐侵入, 生物多样性与森林生态系统的生态功能产生了很大的变化, 但是这方面的研究报道少见。因此, 加强对我国南亚热带森林生态系统中草层植物的研究不仅能填补这方面的研究空白, 而且将极大地丰富和完善森林生态系统的研究理论。

3.3 了解和掌握南亚热带林下幼苗的生态对策

在森林生态系统中, 林下幼苗是植物生活史中对环境反应最敏感的阶段, 幼苗能够成功地定居并生长发育为成熟个体是完成植物群落演替和更新的一个重要过程。植物生活史的早期阶段, 种群的死亡率大都较高。种群内部种子的发芽和定居生长

过程较复杂,幼苗的生长过程一般是种子库-幼苗-多年生苗木的动态生长过程。幼苗发展成为成年树木的过程中受到生境各种因子影响,在这种影响过程中幼苗往往形成不同的生态对策。了解幼苗发生、生长、消亡等过程的生态对策有助于解释树木成年种群的特征以及群落的组成、结构和功能。森林生境的研究也可为幼苗生长动态分析提供理性的数据。因此,在分析幼苗生长动态和更新机制时,有必要了解森林生境因子的变化规律,特别是幼苗周围的生态因子的变化规律。草层植物和枯落物层是幼苗周围的主要生态环境因素,它们对幼苗生长起到重要的作用^[58,59]。将草层植物的生态功能与幼苗的生物学特性结合起来分析,可为深入研究森林群落的动态更新、生物共存及其多样性维持机制提供更广泛的基础。

近年来,国内外开展了很多有关森林生态系统中种子库和幼苗的研究,但多数研究集中在种子库上,而没有把种子库-幼苗-草层植物-乔木有机地结合起来研究。在地理分布方面,我国的研究绝大多数集中在中亚热带以北的森林生态系统^[10,60,61];对南亚热带地区森林生态系统的研究还极少^[62,63]。因此,在南亚热带人工纯林生态系统中开展草层植物对林下幼苗生长发育的影响研究,对进一步了解本气候带植被恢复与森林群落的演替具有重要的科学意义。

3.4 加强草层植物的应用研究

随着经济和技术的发展,人们对草层植物的研究和利用,已不再局限于杂草防治和饲草的生产。草资源的多种生态功能已引起了普遍的重视。然而,应用草层植物的多种生态功能来控制水土流失,实施废水净化,减缓土壤退化等方面的研究仍很少。如何应用包括草类植物在内的不同生态类型植物组成多种人工湿地治理水域富营养化和处理污水,选育优良的草类植物应用于矿区和垃圾场等受损生态系统,这些都是今后草类植物研究的重要领域。此外,牧草良种筛选,草类植物重要工业原料的利用,中草药开发等也是今后生产中的重要方向。

3.5 其他方面

草层植物在复合农林业中的作用还存在很多问题值得研究,如草虫相互作用机理、害虫与草层植物的密度关系,草层密度与作物生产力的关系等等。此外,草本植物与木本植物地下根的相互作用

的机理研究也还极少见报道,而且只有一些探讨性的文章。草层植物与全球变化的关系也是近年来研究的新方向。所有这些都是今后研究草层植物时应该开展或加强的。

参考文献

- [1] Wang X F (王献溥), Hu S S (胡舜士). Characteristic and utilization of grass community in acid soil hill in Guangxi province [J]. *J Nat Resour* (自然资源学报), 1986, 1(1):65-77. (in Chinese)
- [2] China Vegetation Committee (中国植被编辑委员会). *Vegetation of China* [M]. Beijing: Science Press, 1980. 128-156. (in Chinese)
- [3] Guangdong Institute of Botany (广东省植物研究所). *Vegetation of Guangdong* [M]. Beijing: Science Press, 1976. 228-247. (in Chinese)
- [4] Xu X H (徐祥浩). Grass-slope of south China [J]. *Acta Phytoecol Geobot Sin* (植物生态学与地植物学丛刊), 1964, 1(1-2):145-146. (in Chinese)
- [5] Xu X H (徐祥浩). The utilization and reconstruction of "grass-slope" in Guangdong province [J]. *Acta Phytoecol Geobot Sin* (植物生态学与地植物学丛刊), 1982, 6(2):142-146. (in Chinese)
- [6] Zhu B C (朱邦长). Grassland agriculture in tropical and subtropical of China [J]. *Grassland China* (中国草原), 1982, (4):1-6. (in Chinese)
- [7] Zhou S R (周寿荣). The utilization of grassland resources and ecological balance on natural ecosystem of tropical and subtropical zones of south China [J]. *Nat Resour* (自然资源), 1983, 2:1-6. (in Chinese)
- [8] Wang Z H (王铸豪), He D Q (何道泉), Song S D (宋绍敦), et al. The vegetation of Dinghushan Biosphere Reserve [A]. In: *Tropical and Subtropical Forestry Ecosystem Vol. 1*. [C]. Guangzhou: Popular Science Press, 1982. 77-141. (in Chinese)
- [9] Zhang D J (张笃见), Ye X Y (叶晓妮), You W H (由文辉). Evergreen broad-leaved forest floor in Tiantong, Zhejiang province [J]. *Acta Phytoecol Sin* (植物生态学报), 1999, 23(6):544-556. (in Chinese)
- [10] Chen Z Z (陈佐忠), Wang S P (汪诗平). Typical Grassland Ecosystem of China [M]. Beijing: Science Press, 2000. i-iii. (in Chinese)
- [11] Lan C Y, Wong M H. Environmental factors affecting growth of grasses, herbs and woody plants on a sanitary landfill [J]. *J Envir Sci*, 1994, 6(4):504-513.
- [12] Baker A J M, Proctor J. The influence of cadmium, copper, lead and zinc on the distribution and evolution of metallophytes in British Isles [J]. *Plant Syst Evol*, 1990, 173:91-108.
- [13] Shu W S (束文圣), Yang K Y (杨开颜), Zhang Z Q (张志权), et al. Flora and heavy metals in dominant plants growing on an ancient copper spoil heap on Tonglushan in Hubei province, China [J]. *Chin J Appl Envir Biol* (应用与环境生物学报), 2001, 7(1):7-12. (in Chinese)
- [14] Sun Q Y (孙庆业), Lan C Y (蓝崇钰), Hang M H (黄铭洪), et al. Natural colonized plants on tailings of lead-zinc mine [J]. *Acta*

- Ecol Sin (生态学报), 2001, 21(9):1457-1462. (in Chinese)
- [15] Shu W S (束文圣), Lan C Y (蓝崇钰), Zhang Z Q (张志权). Analysis of major constraints on plant colonization at Fankou Pb/Zn mine tailings [J]. Chin J Appl Ecol (应用生态学报), 1997, 8(3):314-318. (in Chinese)
- [16] Ye Z H, Wong J W C, Wong M H. Vegetation response to lime and manure compost amendments on acid lead/zinc mine tailings: a greenhouse study [J]. Restor Ecol, 2000, 8:289-295.
- [17] Tang S R, Wilke B M, Wong M H. Vegetation response to lime and manure compost amendments on acid lead/zinc mine tailings: a greenhouse study [J]. Plant Soil, 1999, 209:225-232.
- [18] Zhou G Y (周国逸). Principles and applications of water and heat in ecosystem [M]. Beijing: Meteorology Press, 1997. 95-108. (in Chinese)
- [19] Ao H X (敖惠修), Xia H P (夏汉平). Reasons for the great flood in Conghua on May 8th and measure for rehabilitating the disaster area [J]. Guangzhou Envir Sci (广州环境科学), 1998, 13(1):36-39. (in Chinese)
- [20] Xia H P (夏汉平). Flood disasters, soil erosion, and eco-restoration of vegetation in the Yangtze and the Pearl River valleys [J]. Trop Geog (热带地理), 1999, 19(2):124-129. (in Chinese)
- [21] Loch R J. Effects of vegetation cover on runoff and erosion under simulated rain and overland flow on a rehabilitated site on the Meandu Mine, Tarong, Queensland [J]. Aust J Soil Res, 2000, 38: 299-312.
- [22] Ding C H (丁朝华), Jin Y X (金义兴), Wu X W (武显维), et al. On the role of complex culture systems of economic plants in soil and water conservation and in resettlement economic of the three-gorge reservoir area [J]. Resour Envir Yangtze Valley (长江流域资源与环境), 1995, 4(3):223-227. (in Chinese)
- [23] Shi Q F (石清峰). Plant grass has the advantage of plant tree in drought region [N]. Papers China Envir (中国环境报), 1998-6-16. (in Chinese)
- [24] Xia H P (夏汉平), Ao H X (敖惠修), He D Q (何道泉), et al. A study on vetiver grasses in soil amelioration, and soil moisture conservation [J]. Trop Geog (热带地理), 1996, 16(3):265-270. (in Chinese)
- [25] Cheng X (程序), Zeng X G (曾晓光), Wang E F (王尔夫). Introduction of Sustainable Agriculture [M]. Beijing: China Agri Press, 1997. 369-410. (in Chinese)
- [26] Descroix L. Influence of soil surface features and vegetation on runoff and erosion in the eastern Sierra Madre (Durango, Northwest Mexico) [J]. Catena, 2001, 43:115-135.
- [27] Xia H P (夏汉平), Ao H X (敖惠修), Liu S Z (刘世忠). The vetiver eco-engineering — A biological technique for realizing sustainable development [J]. Chin J Ecol (生态学杂志), 1998, 17(6):44-50. (in Chinese)
- [28] Xia H P. Development of the vetiver system in Guangdong, China [J]. Tech Bull, No. 2001/3, PRVN/ORDPB, Bangkok, Thailand, 2001, 1-4.
- [29] Yang Y S (杨玉盛), Wang Q Q (王启其), Zou S Q (邹双全), et al. A study on the biomass of *Cunninghamia lanceolata*, *Aleurites fordii*, *Mesora chinensis* compound pattern [J]. J Fujian College For (福建林学院学报), 1996, 16(3):200-204. (in Chinese)
- [30] Peng S L (彭少麟). Utilization and green food production of degradative sloping field in Guangdong [M]. Guangzhou: Guangdong Sci Techn Press, 2001. 43-127. (in Chinese)
- [31] Xia H P (夏汉平), Liu S Z (刘世忠), Ao H X (敖惠修). Plants excellence in erosion control and slope agroforestry [M]. Beijing: Meteorology Press, 2000. 89-109. (in Chinese)
- [32] Li H S (黎华寿), Luo S M (骆世明). The role of grasses in the eco-environmental protection [J]. Ecol Sci (生态科学), 2001, 20(1,2):121-126. (in Chinese)
- [33] Chen K (陈凯), Hu G Q (胡国谦), Rao H M (饶辉茂), et al. Ecological effects of planting vetiver grass in citrus groves on sloping red soil fields [J]. Acta Ecol Sin (生态学报), 1994, 14(3): 249-253. (in Chinese)
- [34] Daly C, Bachelet D, Lenihan J M, et al. Dynamic simulation of tree-grass interactions for global change studies [J]. Ecol Appl, 2000, 10:449-469.
- [35] Mordelet P, Menaut J C. Influence of trees on above-ground production dynamics of grasses in a humid savanna [J]. J Veget Sci, 1995, 6(2):221-223.
- [36] Pearcy R W, Weimin Y. A three-dimensional crown architecture model for assessment of light capture and carbon gain by understory plants [J]. Oecologia, 1996, 108(1):1-12.
- [37] Wang Z W (王正文), Wang D L (王德利), Zang C L (臧传来), et al. The impacts *Betula plantyphylla* on *Carex pediformis* and other main understory herbage plants within secondary forest of Daxinganling mountains [J]. Acta Ecol Sin (生态学报), 2001, 21(8):1301-1307. (in Chinese)
- [38] Knapp R. Translated by Song Y C (宋永昌译). Vegetation Dynamics [M]. Beijing: Science Press, 1986. 86-95.
- [39] Cannell M G R, van Noordwijk M, Ong C K. The central agroforestry hypothesis: the trees must acquire resources that the crop would not otherwise acquire [J]. Agrofor Syst, 1996, 34:27-31.
- [40] Jonsson K L, Fidgeland L, Maghembe J A, et al. The vertical root distribution of fine roots of five tree species and maize in Morogoro, Tanzania [J]. Agrofor Syst, 1988, 6:63-69.
- [41] Singh R P, Ong C K, Saharan N. Above and below-ground interactions in alley cropping in semiarid India [J]. Agrofor Syst, 1989, 9:259-274.
- [42] Schroth G. Tree root characteristics as criteria for species selection and systems design in agroforestry [J]. Agrofor Syst, 1995, 30: 125-143.
- [43] Ong C K, Odongo J C W, Marshall F, et al. Water use of agroforestry systems in semiarid India [A]. In: Calder I R, Hall L R, Adlard P G. Growth and Water Use of Plantations [M]. Chichester: Wiley, 1992. 337-358.
- [44] Breman H, Kessler J J. Woody Plants in Agroecosystems of Semiarid Regions [M]. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 1995. 340.
- [45] Chou C H. Allelopathy in biodiversity and sustainable agriculture [J]. Crit Rev Plant Sci, 1999, 18:609-636.
- [46] Liu D G (刘德广), Liang W G (梁伟光), Ding Y (丁勇), et al. Studies on dynamics of arthropod community in two kinds of litchi orchard habitats [J]. Acta Ecol Sin (生态学报), 1999, 19(6):885-

889. (in Chinese)
- [47] Su D X (苏大学). Development of grassland ecology — measures of keeping soil erosion and rain disaster [J]. Bull Chin Acad Sci (中国科学院院刊), 1999, 2:124–126. (in Chinese)
- [48] Xu G H (许光辉), Zheng H Y (郑洪元), Zhou X Q (周煦卿), et al. Studies on the microbiological properties during the decomposition process of the forest litters [J]. Acta Ecol Sin (生态学报), 1982, 2(1):11–18. (in Chinese)
- [49] Sunil K, Pancholy, Elroy L R. Soil enzymes in relation to old field succession: amylase, cellulase, invertase, dehydrogenase, and urease [J]. Soil Sci Soc Amer Proc, 1973, 37:47–50.
- [50] Ding M M (丁明懋), Yi W M (蚁伟民), Liao L Y (廖兰玉), et al. Effect of ecological conditions on nodulation nitrogen fixation of *Acacia mangium* [J]. J Trop Subtrop Bot (热带亚热带植物学报), 1994, 2(2):15–21. (in Chinese)
- [51] D'antonio C, Vitousek P M. Biological invasions by exotic grasses, the grass/fire cycle, and global change [J]. Ann Rev Ecol Syst, 1992, 23:63–87.
- [52] Tina M C, John W M, Bruce M P. Reducing competitive suppression of a rare annual Forb by restoring native California perennial grasslands [J]. Restor Ecol, 2000, 8(1):18–29.
- [53] Gordon D R, Rice K J. Competitive effects of grassland annuals on soil water and blue oak (*Quercus douglasii*) seedlings [J]. Ecology, 1993, 74(1):68–82.
- [54] Pavlik B M, Nickrent D L, Howald A M. The recovery of an endangered plant. I. Creating a new population of *Amsinckia grandiflora* [J]. Conserv Biol, 1993, 7(3):510–526.
- [55] Ong C K, Leakey R R B. Why tree-crop interactions in agroforestry appear at odds with tree-grass interactions in tropical savannahs [J]. Agrofor Syst, 1999, 45(1):109–129.
- [56] Scholes R J, Archer S R. Tree-grass interactions in Saanas [J]. Annu Rev Ecol Syst, 1997, 28:517–544.
- [57] Peng S L (彭少麟). Forestry Community Dynamic in Lowtropics [M]. Beijing: Science Press, 1996. 12–15. (in Chinese)
- [58] Thompson K. The functional ecology of seed banks [A]. In: Fenner M. Seed, the Ecology of Regeneration in Plant Communities [M]. Melk-sham: Redwood Press Limited, 1992. 231–258
- [59] Tanouchi H, Sato T, Takeshita K. Comparative studies on acorn and seedling dynamics of four *Quercus* species in evergreen broad-leaved forest [J]. J Plant Res, 1994, 107(6):153–159.
- [60] Peng J (彭军), Li X G (李旭光), Dong M (董鸣), et al. Soil seed banks of subtropical, evergreen broad-leaved forest on Sumian mountain, Chongqing [J]. Acta Phytoecol Sin (植物生态学报), 2000, 24(2):209–214. (in Chinese)
- [61] Sun S C (孙书存), Chen L Z (陈灵芝). Seed demography of *Quercus liaotungensis* in Dongling mountain region [J]. Acta Phytoecol Sin (植物生态学报), 2000, 24(2):215–221. (in Chinese)
- [62] Chen Z H (陈章和), Chen H Q (陈惠琴), Liu H Q (刘惠琼), et al. Seed germination and seedling development of several tree species in the lower subtropical evergreen broad-leaf forest [J]. Acta Bot Sin (植物学报), 1995, 37(8):630–635. (in Chinese)
- [63] Zhou X Y (周先叶), Li M G (李鸣光), Wang B S (王伯荪). Soil seed banks in a series of successional secondary communities in Heishiding Nature Reserve, Guangdong province [J]. Acta Phytoecol Sin (植物生态学报), 2000, 24(2):222–230. (in Chinese)
- [64] Zhang Y C (张永才), Lai W Y (赖万玉). Introduction of several fine slope-protected grass [J]. Pratacul Sci (草业科学), 2000, 17(2):26–30. (in Chinese)