

DOI: 10.5846/stxb201405090929

宋同清, 彭晚霞, 杜虎, 王克林, 曾馥平. 中国西南喀斯特石漠化时空演变特征、发生机制与调控对策. 生态学报, 2014, 34(18): 5328-5341.

Song T Q, Peng W X, Du H, Wang K L, Zeng F P. Occurrence, spatial-temporal dynamics and regulation strategies of karst rocky desertification in southwest China. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(18): 5328-5341.

# 中国西南喀斯特石漠化时空演变特征、 发生机制与调控对策

宋同清<sup>1,2,\*</sup>, 彭晚霞<sup>1,2</sup>, 杜 虎<sup>1,2</sup>, 王克林<sup>1,2</sup>, 曾馥平<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125;

2. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 环江 547100)

**摘要:** 中国西南喀斯特石漠化及发展态势的遏制与综合治理是长江、珠江流域的生态安全需要。通过总结前人的研究成果、采集中国科学院环江喀斯特生态试验站部分收集整理和试验数据, 尝试性地提出了新的石漠化概念和分类标准, 探讨了西南喀斯特石漠化的空间分布及动态变化规律, 阐明了不同石漠化程度生态系统的植被和土壤物理、化学、微生物等属性的表现特征, 从自然和人为两个方面揭示了西南喀斯特石漠化的发生机制, 提出了不同石漠化程度的治理对策, 以促进喀斯特区域生态、经济、社会的全面协调与可持续发展。

**关键词:** 西南喀斯特; 石漠化; 时空变化; 发生机制; 综合治理

## Occurrence, spatial-temporal dynamics and regulation strategies of karst rocky desertification in southwest China

SONG Tongqing<sup>1,2,\*</sup>, PENG Wanxia<sup>1,2</sup>, DU Hu<sup>1,2</sup>, WANG Kelin<sup>1,2</sup>, ZENG Fuping<sup>1,2</sup>

1 Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China

2 Huanjiang Observation and Research Station of Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547100, China

**Abstract:** The karst landscape in China are mainly located in the southwest of China around Guizhou province and cover an area of 550 000 km<sup>2</sup>. Southwest China is most famous in the world for the continuous distribution of karst landscape, for holding the largest area of bare carbonate rocks and for experiencing the strongest karst development in the world. The karst area in southwest China is characterized by unique geological background, high landscape heterogeneity, low ecological capacity. In the meanwhile, this region is populous and in turn the exploitation of natural resources has been very high. For example, most natural vegetation has been converted to croplands. As a consequence, the region has experienced serious soil erosion or rocky desertification over the past decades due to the fragile nature of the ecosystems here, which posed great threat on the sustainable development of this region. In addition, since southwest China is located in the headwaters region of the Pearl River and Yangtze River, the ecological degradation in this region directly impacts the ecological safety the in the middle or lower reaches of the two rivers' watersheds. Therefore, a comprehensive control of the karst rocky desertification and an effective restoration of the degraded areas are necessary for ensuring the ecological security of the Yangtze and Pearl rivers' watersheds. In this paper, we systematically synthesized the information regarding rock desertification in the karst area in southwest China obtained largely from but not limited to Huanjiang Observation and

**基金项目:** 中国科学院西部行动计划项目 (KZCX2-XB3-10); 国家自然科学基金项目 (U1033004, 31370485)

**收稿日期:** 2014-05-09; **修订日期:** 2014-08-11

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: songtongq@163.com

Research Station of Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences. We proposed a new definition of rocky desertification and its classification criteria. Based on remote sensing data, we discussed the spatial distribution and dynamics of rock desertification in the karst area in southwest China. At different stages of rocky desertification, the ecosystems were related to different characteristics embodied by a combination of vegetation, soil physics, chemistry, and microorganism. The occurrence of karst rocky desertification was explained from natural factors (e.g., geological factors) and human activities, especially agricultural activities. We proposed several regulation strategies according to the degree of rocky desertification to boost the harmonious and sustainable development of ecology, economy and society in the karst areas of southwest China.

**Key Words:** karst area; rocky desertification; spatial-temporal dynamics; occurrence; regulation strategies

全球喀斯特面积约 2 200 万  $\text{km}^2$ , 占世界陆地面积的 12% 左右, 中国境内碳酸盐岩类岩层纵横广, 喀斯特现象普遍, 类型繁多, 形式多样, 发育强烈。喀斯特面积为 344.4 万  $\text{km}^2$ , 裸露面积为 90.7 万  $\text{km}^2$ , 主要集中在以贵州为中心的西南部 ( $102^\circ\text{—}111^\circ\text{E}$ ,  $23^\circ\text{—}32^\circ\text{N}$ ), 面积约为 55 万  $\text{km}^2$ , 是全球三大岩溶集中分布区中连片裸露碳酸盐岩面积最大、岩溶发育最强烈的地区<sup>[1-2]</sup>。西南喀斯特地区地质背景特殊, 景观异质性强, 岩溶作用强烈, 生态环境容量小, 但人口众多, 尖锐的人地矛盾导致植被破坏和水土流失日益严重, 产生了十分严重的石漠化现象, 且呈不断扩张的态势, 严重制约了该区域可持续发展, 直接威胁到长江、珠江流域生态安全<sup>[3]</sup>。很多学者从不同角度尝试研究和探讨了西南喀斯特生态系统退化机理和石漠化发生机制<sup>[4-13]</sup>, 提出了许多有益的生态恢复与综合治理措施, 特别是近年来通过“退耕还林还草”、“坡耕地整治”、“生态扶贫”、“天保”、“石漠化综合治理”等以植被恢复为主的宏观生态工程的实施, 涌现出了广西环江和马山、贵州毕节和贞丰、湖南龙山和永州等一些成功的石漠化治理模式<sup>[13-19]</sup>, 石漠化治理与生态恢复初见成效, 但由于土壤原生境被破坏, 且忽略了经济效益, 无法实现区域生态、经济双赢的可持续发展目标, 出现了不同程度的返“贫”返“漠”现象, 石漠化快速发展的总体趋势没有得到有效的遏制<sup>[20]</sup>。本文通过总结前人的研究成果和采集中国科学院环江喀斯特试验站部分收集整理和试验观测数据, 尝试提出了新的“石漠化”概念和分类标准, 探讨了西南喀斯特石漠化的空间分布及动态变化规律, 阐明了不同石漠化程度的生态系统特征, 从自然和人为干扰两个方面揭示了西南喀斯特石漠化的发生机制, 针对性的制定了不同石漠化程度生态恢复与综合治理关键技术, 为促进

西南喀斯特区域生态、经济、社会的协调发展提供一定的理论依据。

## 1 石漠化概念及演绎

石漠化起源于荒漠化研究, 1949 年, 法国科学家 A. Aubreville 在研究非洲热带和亚热带森林的稀树草原化过程时, 首次提出了荒漠化 (Desertification) 的概念。1977 年召开的联合国荒漠化会议 (UNCOD) 诞生了荒漠化的定义: “荒漠化是土地生物潜力的下降或破坏, 并最终导致类似于荒漠景观条件的出现。” Desertification 作为第一个荒漠化定义被联合国正式采纳<sup>[21]</sup>。后来, 国内部分学者提出了湿润地区荒漠化问题, 并指出石灰岩风化壳上发育的荒漠化土地主要分布在四川、贵州、云南、广东、广西、湖南, 又称石漠化土地<sup>[22]</sup>。

袁道先采用石漠化概念来表征植被、土壤覆盖的喀斯特地区转变为岩石裸露的喀斯特景观的过程, 并指出石漠化是中国南方亚热带喀斯特地区严峻的生态问题, 导致了喀斯特风化残积层土的迅速贫瘠化<sup>[23]</sup>。

罗中康认为, 喀斯特地区的森林植被一旦遭到破坏, 不仅难以恢复, 而且必然造成大量的水土流失、土层变薄、土地退化、岩石出露、形成奇特的石漠化景观<sup>[24]</sup>。

熊康宁等认为, 喀斯特石漠化是在喀斯特脆弱生态环境下, 人类不合理的社会经济活动, 造成人地矛盾突出、植被破坏、水土流失、岩石逐渐裸露、土地生产力衰退丧失, 地表在视觉上呈现类似于荒漠化景观的演变过程<sup>[9]</sup>。

王世杰认为喀斯特石漠化是指在亚热带脆弱的喀斯特环境背景下, 受人类不合理社会经济活动的干扰破坏, 造成土壤严重侵蚀, 基岩大面积出露, 土

地生产力严重下降,地表出现类似荒漠景观的土地退化过程<sup>[25]</sup>。

刘丛强等认为,喀斯特石漠化可简单理解为植被、土壤覆盖高的喀斯特景观转变为岩石裸露率高的喀斯特景观的过程<sup>[5]</sup>。人类活动、活动断裂、冻融作用、水土流失、地震、滑坡、崩塌、泥石流等及与之相关地球化学过程均可促使植被、土壤高覆盖的喀斯特地区转变为岩石裸露的喀斯特景观。

石漠化是指碳酸盐岩地区生态地质脆弱环境下,干扰(人类、地质变化、自然灾害等)和岩溶相互作用而造成的植被破坏、水土流失、土地质量下降直至岩石裸露、出现类似荒漠化景观的生态系统复合退化过程。其中脆弱的生态地质环境为基础,干扰特别是人类不合理的经济活动为驱动力,植被退化为诱因,土地生产力下降为本质,荒漠化景观为标志。

2 石漠化类型及特征

对石漠化进行科学评定等级和分类,既有利于分析、了解石漠化的现状与程度,又便于在此基础上分门别类的制定合理的石漠化治理规划与方案。

熊康宁等按照综合性原则、主要因素原则、简单性原则、现状与潜力相结合的原则、相对一致性原则等将喀斯特石漠化划分为无明显石漠化、潜在石漠化、轻度石漠化、中度石漠化、强度石漠化、极强度石漠化六级标准<sup>[9]</sup>。张信宝等考察了贵州、云南和广

西的部分石漠化喀斯特山地,对西南亚热带喀斯特山地石漠化提出了新的认识<sup>[8]</sup>,认为现行的石漠化程度分级过于简单,不能反映石漠化前后地面物质组成和植被景观的变化,难以满足石漠化治理规划编制和措施选择的需要,提出基于土壤流失程度和地面物质组成类型的石漠化程度的叠加分类。两种分类较全面地反映了石漠化坡地的现今景观特征和石漠化前后的景观变化,可以更好地满足石漠化成因分析、石漠化治理规划编制和治理措施选择的需要。但却没有体现分类原则上的应用性和简单性,实际应用中存在一定局限性。蒋忠诚等从直观性、简易性和可操作性出发,以岩石裸露率作为石漠化等级划分标准,将石漠化划分为5类等级<sup>[6]</sup>,虽然实用,但未能综合体现石漠化的内涵,如贵州茂兰和广西木论自然保护区的原始森林大部分生长在悬崖陡壁、裸露的岩石上和岩石裂隙中,林下岩石裸露率相当高。

根据直观性、简单性、可操作性、主导因素和综合代表性原则,以岩石裸露率和植被覆盖率作为石漠化等级划分的基本依据,将石漠化划分为无石漠化(Ⅰ)、潜在石漠化(Ⅱ)、轻度石漠化(Ⅲ)、中度石漠化(Ⅳ)、重度石漠化(Ⅴ)5级标准。认为既比较科学地反映了石漠化程度的内涵和差异,又具有可操作性,可供推广使用。各级石漠化程度的特征和简单利用如表1。

表 1 石漠化等级划分  
Table 1 Graduation of rock desertification

| 程度<br>Degree | 岩石裸露程度<br>Rock percentage/% | 植被覆盖率<br>Coverage/% | 特征与利用<br>Characteristics and utilization |
|--------------|-----------------------------|---------------------|------------------------------------------|
| Ⅰ            | <10                         | >70                 | 乔灌草植被、土层厚且连续,宜农林牧                        |
| Ⅱ            | 10—30                       | >60                 | 灌乔草植被、土层较薄但连续,宜林牧                        |
| Ⅲ            | 30—50                       | 30—60               | 乔草+灌草、土被不连续,宜林牧                          |
| Ⅳ            | 50—70                       | 10—30               | 疏草+疏灌、土浅薄且散布,自然恢复                        |
| Ⅴ            | >70                         | <10                 | 疏草、土零星分布,难利用                             |

Ⅰ:无石漠化 No rock desertification; Ⅱ:潜在石漠化 Latent rock desertification; Ⅲ:轻度石漠化 Slight rock desertification; Ⅳ:中度石漠化 Medium rock desertification; Ⅴ:重度石漠化 Severe rock desertification

3 石漠化的空间分布

石漠化是我国西南喀斯特地区最大的生态问题,中国地质科学院岩溶地质研究所 2003—2005 年

利用遥感技术探查了西南地区石漠化分布现状,与此同时,国家林业局于 2004—2005 年采用地面调查与遥感技术相结合、以地面调查为主的技术方法,摸清了西南喀斯特石漠化的分布状况,结果显示,截止

2005 年底,西南喀斯特石漠化土地总面积为 12.96 万 km<sup>2</sup>,占区域总面积的 12.1%,占区域喀斯特面积的 28.7%<sup>[5]</sup>。

从行政区划角度出发,涉及湖北、湖南、广东、广西、贵州、云南、重庆、四川 8 省(自治区、直辖市)的 460 个县(市、区)。在这 8 省区中,贵州省石漠化面积达 3.32 万 km<sup>2</sup>,占石漠化总面积的 25.6%,其后依次为云南 2.88 万 km<sup>2</sup>、广西 2.38 万 km<sup>2</sup>、湖南 1.48 万 km<sup>2</sup>、湖北 1.13 万 km<sup>2</sup>、重庆 0.93 万 km<sup>2</sup>、四川 0.76 万 km<sup>2</sup>和广东 0.08 万 km<sup>2</sup>,分别占石漠化总面积的 22.2%、18.4%、11.4%、8.7%、7.1%、6.0% 和 0.6%。主要集中在黔、滇、桂 3 省区,3 省区发生石漠化的面积为 8.58 万 km<sup>2</sup>,占石漠化总面积的 66.13%;3 省区石漠化严重县(指石漠化面积达 300 km<sup>2</sup>的县)个数分别为 48 个、37 个和 30 个,占石漠化严重县总数的 68.05%,集中分布在黔西南、桂西及滇东区域。

从流域分布来看,石漠化主要分布在长江流域和珠江流域,其中长江流域面积最大,为 7.32 万 km<sup>2</sup>,占石漠化总面积的 56.5%;珠江流域次之,为 4.87 万 km<sup>2</sup>,占 37.5%;其他依次为红河流域 0.52 万 km<sup>2</sup>,占 4.0%;怒江流域 0.18 万 km<sup>2</sup>,占 1.4%;澜沧江流域 0.08 万 km<sup>2</sup>,占 0.6%。

就石漠化程度而言,根据中国国际工程咨询公司编制的《岩溶地区石漠化综合治理规划大纲(2006—2015)》,我国西南喀斯特区域现有石漠化土地面积 12.96 万 km<sup>2</sup>。其中,轻度石漠化面积为 3.56 万 km<sup>2</sup>,占石漠化总面积的 27.47%;中度石漠化面积为 5.91 万 km<sup>2</sup>,占石漠化面积的 45.60%;重度石漠化面积为 3.49 万 km<sup>2</sup>,占 26.93%,中度以上石漠化面积占到了石漠化总面积的 72.53%(图 1)。

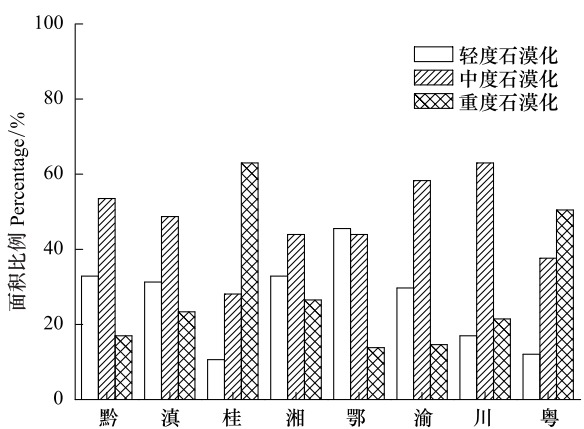


图 1 各省(区、市)不同等级石漠化面积比例  
Fig.1 The area proportion of different graduation rocky desertification in different provinces (autonomous regions and municipalities)

4 石漠化的数量变化

我国石漠化的数量和空间分布随时间的变化而不断演变,总体而言呈增加的趋势,不同区域、不同尺度、不同研究方法石漠化的年扩张率不同。杨青青利用遥感技术分析了桂西喀斯特石漠化 1990—2005 年 15 年间的变化规律,结果显示:1990 年石漠化总面积为  $2.37 \times 10^3$  km<sup>2</sup>,石漠化发生率为 10.50%,占国土面积的 7.08%;2005 年石漠化总面积增长为  $2.69 \times 10^3$  km<sup>2</sup>,石漠化发生率增长为 11.95%,占国土面积的 8.02%;从 1990 年到 2005 年的 15 年间,桂西石漠化总体扩张了 323.49 km<sup>2</sup>,平均每年扩张 0.91%<sup>[11]</sup>。两个时期石漠化等级结构发生了变化。潜在和轻度石漠化占总石漠化面积的比例变小,中度以上石漠化比例增加,增幅最大的是强度石漠化。中度以上石漠化面积扩张较大,扩张程度最大的是强度石漠化,年变化率在 2.89%。潜在和轻度石漠化的年变化率较小,仅为 0.23%和 0.24%(表 2)。

表 2 喀斯特地区不同等级石漠化面积变化  
Table 2 Area dynamics of different grade rocky desertification in karst region

| 等级<br>Degree                      | 1990 面积/km <sup>2</sup><br>Area | 2005 面积/km <sup>2</sup><br>Area | 变化面积 /km <sup>2</sup><br>Changes of area | 变化率/%<br>Variation | 年变化率/%<br>Annual variation |
|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------------------|--------------------|----------------------------|
| 无石漠化 No rock desertification      | 20204.33                        | 19880.84                        | -323.49                                  | -1.60              | -0.11                      |
| 潜在石漠化 Latent rock desertification | 519.59                          | 537.46                          | 17.87                                    | 3.44               | 0.23                       |
| 轻度石漠化 Slight rock desertification | 883.08                          | 914.53                          | 31.45                                    | 3.56               | 0.24                       |
| 中度石漠化 Medium rock desertification | 616.31                          | 737.86                          | 121.55                                   | 19.72              | 1.31                       |
| 重度石漠化 Severe rock desertification | 351.93                          | 504.45                          | 152.52                                   | 43.34              | 2.89                       |

中国地质科学院调查结果表明,我国西南喀斯特地区 20 世纪 80 年代末至 90 年代末的石漠化面积从 82 942.65 km<sup>2</sup>增加到 105 063.2 km<sup>2</sup>,平均每年增加 1 650.26 km<sup>2</sup>,年平均增长率为 2%<sup>[5]</sup>。根据国土部门监测,从 1987 年到 1999 年,西南喀斯特区石漠化面积由 9.12 万 km<sup>2</sup>增加到了 11.35 万 km<sup>2</sup>,净增 2.23 万 km<sup>2</sup>,平均每年增加 1856 km<sup>2</sup>,年均增长率达 1.86%。近 15 年来,我国石漠化仍呈不断扩张的态势,其扩张率有增无减。

5 不同石漠化程度的生态系统特征

中国科学院环江喀斯特试验站基于 5 个不同级别的石漠化程度,各建立了 6 个 20m×20m 的样地,通过植被、土壤的详细调查和分析,发现随着植被的不断恢复,石漠化程度越来越轻。植被恢复的早期阶段以土壤性质的内因演替为主,土壤的性质影响植被的变化,同时也因植被的变化而变化,这种相互促进作用在经过一段时间的演替,土壤和植被群落均受气候的限制,进化为以生态平衡为标志的顶极群落即喀斯特常绿落叶阔叶混交林<sup>[26-30]</sup>。

5.1 不同石漠化生态系统的植被群落特征

随着石漠化程度的增强,植物群落由原生林→

次生林→灌丛→稀灌草丛→稀疏草丛依次退化,植物群落分化和层次结构越来越不明显,群落的高度越来越低,个体和生物量越来越小<sup>[31]</sup>;重度石漠化只有零星分布的小草,其他石漠化生态系统的植物群落密度越来越高,物种丰富度、香农指数、均匀度越来越低,生态优势度呈增加趋势(表 3)。

5.2 不同石漠化程度的土壤物理属性

土壤颗粒、容重和含水量是表征土壤组成、结构和水源涵养功能的物理指标,土壤颗粒组成是构成土壤结构体的基本单元,并与其成土母质及其理化性状和侵蚀强度密切相关<sup>[32]</sup>。随着植被的退化和石漠化程度的增加,粉粒和粘粒明显下降,砂粒和土壤容重增加(表 4)。5 类不同石漠化程度的石灰土>0.25 mm 的水稳性大团聚体含量分别高达 73.91%、88.67%、95.13%、93.73%和 89.51%,>2mm 的大粒径团聚体也分别高达 28.81%、61.99%、76.89%、74.19%和 76.44%,石灰土大团聚体的数量多、比重大,土壤的抗蚀性强,随着植被的退化和石漠化程度的增加,>0.25 mm 和>2 mm 的水稳性团聚体数量呈下降趋势,土壤的抗蚀性越来越差(表 5)<sup>[33-34]</sup>。

表 3 不同石漠化生态系统植物群落特征

Table 3 Characteristics of plant community in different rocky desertification ecosystems

| 指标 Index                         | I                     | II                      | III         | IV                           | V                    |
|----------------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------|------------------------------|----------------------|
|                                  | 原生林<br>Primary forest | 次生林<br>Secondary forest | 灌丛<br>Shrub | 稀灌草丛<br>Sparse shrub & grass | 稀疏草丛<br>Sparse grass |
| 高度 Height/m                      | 15.56                 | 4.74                    | 1.86        | 3.56                         | 0.2                  |
| 密度 Density/(株/m <sup>2</sup> )   | 9.31                  | 15.4                    | 53.2        | 17.8                         | 0.09                 |
| 总盖度 Coverage                     | 0.80                  | 0.80                    | 0.45        | 0.25                         | 0.01                 |
| 物种丰富度 Abundance                  | 46                    | 34                      | 27          | 39                           | —                    |
| 香农指数 Shannon index               | 4.13                  | 3.82                    | 3.34        | 3.84                         | —                    |
| 优势度指数 Dominance index            | 0.67                  | 0.8                     | 0.76        | 0.81                         | —                    |
| 均匀度指数 Pielou evenness            | 0.23                  | 0.16                    | 0.11        | 0.1                          | —                    |
| 生物量 Biomass/(t/hm <sup>2</sup> ) | 131.42                | 68.76                   | 27.18       | 17.46                        | 1.28                 |

I :无石漠化 No rock desertification; II :潜在石漠化 Latent rock desertification; III :轻度石漠化 Slight rock desertification; IV :中度石漠化 Medium rock desertification; V :重度石漠化 Severe rock desertification

表 4 不同石漠化程度的土壤物理属性

Table 4 Soil physical properties in different rocky desertification ecosystems

| 程度<br>Degree | 砂粒 Sand  |             | 粉粒 Silt      | 粘粒 Clay  | 含水量             | 容重 Bulk density/     | 孔隙度 Porosity/ |
|--------------|----------|-------------|--------------|----------|-----------------|----------------------|---------------|
|              | 2—0.25mm | 0.25—0.05mm | 0.05—0.002mm | <0.002mm | Water content/% | (g/cm <sup>3</sup> ) | %             |
| I            | 0.44     | 6.51        | 43.14        | 46.98    | 26.92           | 1.17                 | 55.85         |
| II           | 0.46     | 10.75       | 40.75        | 44.87    | 24.55           | 1.28                 | 51.70         |
| III          | 0.71     | 11.86       | 45.39        | 34.94    | 29.10           | 1.26                 | 52.45         |
| IV           | 2.30     | 5.26        | 39.24        | 42.69    | 26.05           | 1.39                 | 47.55         |
| V            | 0.93     | 2.73        | 8.86         | 16.60    | 21.75           | 1.46                 | 44.91         |

表 5 不同石漠化程度的土壤水稳性团聚体组成

Table 5 Distribution of soil water-stable aggregates in different rocky desertification ecosystems/%

| 程度 Degree | > 2mm | 1—2mm | 0.5—1mm | 0.25—0.5mm | 0.053—0.25mm | <0.053mm |
|-----------|-------|-------|---------|------------|--------------|----------|
| I         | 68.42 | 9.63  | 6.62    | 4.84       | 2.46         | 8.03     |
| II        | 69.27 | 8.93  | 7.99    | 7.18       | 4.27         | 2.37     |
| III       | 73.14 | 9.42  | 7.57    | 4.99       | 1.82         | 3.05     |
| IV        | 54.97 | 12.61 | 10.85   | 10.24      | 7.09         | 4.25     |
| V         | 21.29 | 13.67 | 16.75   | 22.21      | 14.09        | 11.99    |

5.3 不同石漠化程度的土壤化学性状

石灰岩山地发育的石灰土一般富含碳酸钙, pH 值较高,但西南喀斯特高温多雨,土壤中的钙、镁大量淋失,生长发育良好和覆盖度较高的群落其地表枯枝落叶量大,释放出许多酸性物质进入土壤,对岩石风化形成的碱性物质起到中和作用,不同石漠化程度 pH 值在 7.28—7.83 之间,呈微碱性反应,变化不大(表 6)。西南喀斯特属热带、亚热带季风气候,温湿条件优越,极有利于生物的繁衍与生长,生物“自肥”作用强烈,同时加速了岩石的溶蚀、风化和土

壤形成与发育进程,且普遍存在“石碗土”现象,养分与水分容易聚集,与同区域的红壤相比,养分含量均很高。有机质:57.47—98.12 g/kg,全氮:1.94—4.83 g/kg,全磷:0.89—1.86 g/kg,全钾:0.79—4.90g/kg,碱解氮:223.03—432.45 mg/kg,速效钾:27.18—118.72 mg/kg,速效磷 3.31—8.31 mg/kg,阳离子交换量:161.13—403.20 mmol/kg,且随石漠化程度的降低呈逐步增加的趋势,无石漠化土壤的有机质、养分和阳离子交换量均最高(表 6)<sup>[35-39]</sup>。

表 6 不同石漠化程度土壤养分状况

Table 6 The conditions of soil nutrient in different rocky desertification ecosystems

| 程度 Degree | pH   | 有机质 Organic matter/(g/kg) | 全氮 Total nitrogen/(g/kg) | 全磷 Total phosphorus/(g/kg) | 全钾 Total potassium/(g/kg) | 碱解氮 Available nitrogen/(mg/kg) | 有效磷 Available phosphorus/(mg/kg) | 有效钾 Aailable potassium/(mg/kg) | 阳离子交换量 Cation exchange capacity/(mmol/kg) |
|-----------|------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------|
| I         | 7.75 | 98.12                     | 4.83                     | 1.86                       | 4.90                      | 432.45                         | 118.72                           | 8.31                           | 403.20                                    |
| II        | 7.70 | 78.11                     | 4.01                     | 1.19                       | 4.12                      | 392.76                         | 84.75                            | 3.42                           | 379.09                                    |
| III       | 7.28 | 76.04                     | 2.76                     | 1.13                       | 4.70                      | 267.05                         | 91.89                            | 3.75                           | 365.67                                    |
| IV        | 7.73 | 77.83                     | 3.04                     | 1.17                       | 4.05                      | 254.47                         | 83.43                            | 4.91                           | 335.45                                    |
| V         | 7.83 | 57.47                     | 1.94                     | 0.89                       | 0.79                      | 223.03                         | 27.18                            | 3.31                           | 161.13                                    |

5.4 不同石漠化程度的土壤矿质全量

矿质元素是土壤组成的重要部分,是植物生长良好的保障条件。土壤矿物质的化学组成与成土条件和成土过程密切相关,对土壤的性质有极大的影响,分析土壤矿质全量的化学组成能够了解土壤的风化发育程度,阐明土壤化学性质在成土过程中的演变情况及土壤肥力背景状况<sup>[40]</sup>。西南喀斯特石灰土的 SiO<sub>2</sub>含量随石漠化程度的增加而增加,重度石漠化土壤 SiO<sub>2</sub>含量高达 72.68%;Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的含量分别为 12.38%—20.45%、4.31%—10.99%,其中潜在、中度和轻度石漠化土壤的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的含量较高,更有利于 Fe、Al 的富集;土壤 CaO 和 MgO 含量分别为 0.25%—4.59%和 0.86%—2.42%,均随石

漠化程度的增加而明显降低;MnO 的含量很低,规律性不强(表 7)<sup>[41-42]</sup>。

5.5 不同石漠化程度的土壤微生物特征

土壤微生物种群数量受多种因素的影响,能够敏感地反映不同石漠化程度土壤生态系统的细微变化,是土壤质量变化的敏感性指标。西南喀斯特地区土壤微生物种群数量均较高(表 8),微生物种群数量组成上细菌的比例为 3.54%—59.88%,放线菌为 27.97%—96.44%,真菌的比例很小,不足 1%,随着植被退化和石漠化程度的增加,土壤微生物种群数量呈逐步下降趋势,但其总数量的变化趋势和组成与地带性红壤不同,并不完全与细菌相同,而是受细菌和放线菌的共同控制。这主要是因为石生植物

的根系可能向土壤中分泌了刺激微生物生长特别是放线菌生长的物质,使微生物各种类数量特别是放线菌数量大幅度增加,随着石漠化程度的加剧,土壤微生物数量特别是放线菌数量减少,其分解林木凋

落物中含有较多木质化纤维成分等难分解物质的能力下降,土壤生态系统物质和能量循环的能力减弱<sup>[43]</sup>。

表 7 不同石漠化程度土壤矿质全量

Table 7 The soil mineral components in different rocky desertification ecosystems

| 程度 Degree | SiO <sub>2</sub> /% | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /% | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /% | CaO /% | MgO /% | MnO/ % |
|-----------|---------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------|--------|--------|
| I         | 41.67               | 12.38                             | 5.88                              | 4.59   | 2.42   | 0.19   |
| II        | 40.08               | 16.15                             | 6.74                              | 2.01   | 1.57   | 0.30   |
| III       | 44.88               | 17.07                             | 7.06                              | 3.03   | 1.96   | 0.30   |
| IV        | 43.49               | 20.45                             | 10.99                             | 0.81   | 2.02   | 0.28   |
| V         | 72.68               | 13.55                             | 4.31                              | 0.25   | 0.86   | 0.11   |

土壤微生物生物量碳(MBC)、氮(MBN)、磷(MBP)不仅是研究土壤有机质、氮和磷循环及其转化过程的重要指标,而且是综合评价土壤质量和肥力状况的指标之一<sup>[44-45]</sup>。西南喀斯特土壤微生物MBC的含量接近和超过了亚热带稻田土壤<sup>[46]</sup>,随着石漠化程度的增加,植被覆盖度减少,土壤微生物生活的环境质量下降,土壤微生物MBC的含量急剧下降,但MBN的含量有小幅度的提高(表9),这与陈国潮和何振立研究认为土地利用方式对红壤土壤微生物BMN的影响相对较小结果相似<sup>[47]</sup>,MBP的含

量随石漠化变化的规律性不强。土壤微生物生物量碳与微生物量氮(MBC/MBN)的比值是否恒定,不同的学者其观点不同,Anderson等<sup>[48]</sup>认为MBC/MBN平均值为6.7,陈国潮和何振立<sup>[47]</sup>认为红壤土壤MBC/MBN平均值为6.2,西南喀斯特重度石漠化的土壤的MBC/MBN很低,仅为2.86,其他不同程度石漠化土壤的MBC/MBN高达10.69—17.98,可见,石漠化程度减弱明显改变了土壤微生物的群落结构,提高了微生物生物量碳的固持能力<sup>[49-51]</sup>。

表 8 不同石漠化程度土壤微生物种群数量

Table 8 The main microbial population in different rocky desertification ecosystems

| 程度 Degree | 细菌 Bacteria/<br>(×10 <sup>6</sup> cfu/g) | 真菌 Fungi/<br>(×10 <sup>4</sup> cfu/g) | 放线菌 Actinomycetes/<br>(×10 <sup>6</sup> cfu/g) | 总数 Sum/<br>(×10 <sup>6</sup> cfu/g) | 细菌比例 Percentage of Bacteria/% | 真菌比例 Percentage of fungi/% | 放线菌比例 Percentage of actinomycetes/% |
|-----------|------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| I         | 16.83                                    | 3.37                                  | 252.42                                         | 269.28                              | 6.25                          | 0.01                       | 93.74                               |
| II        | 9.06                                     | 7.00                                  | 247.12                                         | 256.25                              | 3.54                          | 0.03                       | 96.44                               |
| III       | 6.18                                     | 2.95                                  | 4.98                                           | 11.19                               | 55.25                         | 0.26                       | 44.49                               |
| IV        | 1.07                                     | 2.80                                  | 4.22                                           | 5.32                                | 20.19                         | 0.53                       | 79.29                               |
| V         | 2.67                                     | 3.81                                  | 1.75                                           | 4.47                                | 59.88                         | 0.85                       | 39.27                               |

表 9 不同石漠化程度土壤微生物生物量

Table 9 Soil microbial biomass in different rocky desertification ecosystems

| 程度 Degree | 碳 MBC/(mg/kg) | 氮 MBN/(mg/kg) | 磷 MBP/(mg/kg) | MBC/MBN |
|-----------|---------------|---------------|---------------|---------|
| I         | 559.78        | 33.21         | 10.58         | 16.86   |
| II        | 776.16        | 44.52         | 22.87         | 17.43   |
| III       | 506.55        | 32.70         | 56.97         | 15.49   |
| IV        | 131.72        | 46.13         | 7.92          | 2.86    |
| V         | 268.28        | 25.10         | 7.39          | 10.69   |

## 6 石漠化发生机制

### 6.1 自然因素

#### 6.1.1 动力潜能和物质基础

在古环境岩溶过程中,自晚震旦纪到三叠纪晚期,发育了四大碳酸盐岩沉积构造,纯碳酸盐岩底层构成了喀斯特石漠化的物质基础,强烈的地质运动塑造了陡峻而破碎的喀斯特地貌景观,由此而产生了较大的地表切割度和地形坡度,形成了类型多样的地貌结构,提供了水土流失和石漠化的动力潜能<sup>[52-53]</sup>。

#### 6.1.2 地形地貌

石漠化的发生发展与喀斯特微地貌特别是地形坡度有着十分密切的关系,据国家林业局 2004—2005 年监测数据,西南喀斯特石漠化主要发生于坡度较大的坡面上,发生在 16°以上的坡面上的石漠化面积高达 11 万 km<sup>2</sup>,占石漠化土地总面积的 84.9%,不同石漠化程度的石漠化发生率随坡度等级(1—8 坡度等级依次为 0°—3°、3°—8°、8°—15°、15°—25°、25°—35°、35°—45°、45°—60°和 60°—88°)的升高而升高,任一坡度石漠化的发生率均为:轻度石漠化>中度石漠化、潜在石漠化>强度石漠化<sup>[11]</sup>。王明章和王尚彦<sup>[54]</sup>对贵州石漠化分布的相关研究中发现,发生在喀斯特丘陵中的石漠化面积最大(丘陵区的坡度一般为 2 级坡度,即 3°—8°),达 8 146.01 km<sup>2</sup>,占贵州省石漠化总面积的 25.08%;其次是发生在峰林洼地中的石漠化,面积为 7 609.13 km<sup>2</sup>,占 23.43%;峰丛洼地中石漠化面积为 6631.30 km<sup>2</sup>,占 20.42%;喀斯特山地中的石漠化面积为 4 705.43 km<sup>2</sup>,占 14.49%;这四种地貌类型中的石漠化面积占到了整个贵州石漠化总面积的 83%左右。而喀斯特槽谷、喀斯特平原和喀斯特峡谷中的石漠化面积分别为 2581.09、162.44 km<sup>2</sup>和 1 181.33 km<sup>2</sup>,分别占 7.95%、5%和 3.64%。

高峰丛洼地-中峰丛洼地-峰林谷地是喀斯特溶蚀作用逐渐深入的 3 种地貌。高峰丛洼地的山峰溶蚀程度低,基座粘连在一起。中峰丛洼地进一步被溶蚀,峰林谷地是溶蚀的后期阶段。杨青青<sup>[11]</sup>指出,随着溶蚀作用的逐步深入,高峰丛洼地区、中峰丛洼地区、峰林谷地区 3 种地貌区的石漠化发生率逐渐降低。溶蚀程度较高的峰林谷地,石漠化发生

率较低,更适宜农耕和人类居住。

#### 6.1.3 岩性

西南喀斯特地区地层的岩性以灰岩为主,不同岩组不同程度地混有砂页岩等其他岩性岩石。把这些岩组按照碳酸盐岩含量分成 4 组,分别为连续性灰岩,灰岩夹碎屑岩,灰岩与白云岩混合组合,灰岩与碎屑岩互层组合。按照碳酸盐岩的分类体系<sup>[55]</sup>,连续性灰岩、灰岩与白云岩混合组合属于连续性碳酸盐岩,含量>90%;灰岩夹碎屑岩属于碳酸盐岩夹碎屑岩组合,含量 70%—90%;灰岩与碎屑岩互层组合属于碳酸盐岩与碎屑岩互层,含量 30%—70%。碳酸盐岩含量越高,石漠化发生率越高,分布在连续性灰岩区域的石漠化面积最大,在各个等级石漠化中的比例均大于 68%;灰岩夹碎屑岩次之;灰岩与白云岩混合组合更少;灰岩与碎屑岩互层组合岩性的石漠化面积很少。4 组石漠化发生率分别为 25.42%、24.81%、20.56%和 1.25%。强度石漠化中,前 3 组的比例依次为 75%、8%和 16%。中度石漠化中,发生在灰岩夹碎屑岩岩性上的石漠化比例较大,为 25%<sup>[11]</sup>。

#### 6.1.4 溶蚀性和成土速度

西南喀斯特高温多雨,年平均气温在 15℃以上,向南逐渐增高到 20—24℃(广西和云南南部),大于 10℃积温在 5 000—8 000℃左右。年平均日照数一般为 1 200—1 600 h,往南高达 1 800—2 000 h,且年际变化不大。年日照百分率为 25%—42%。年降水量为 1 000—1 600 mm,最高达 1 800—2 000 mm,年均相对湿度为 75%—80%,具有水热同期的分布特点,但降水的时空分布极不均匀。碳酸盐岩溶蚀性强,90%的溶蚀物随水流失,又加上岩石中 Si、As、Fe 等成土元素含量低,成土速度缓慢,年成土模数平均值为 50 t/km<sup>2</sup>,形成 1 cm 厚土壤需 2000—3000 年以上,是其他类型母岩成土时间的 10 倍,土层浅薄且不连续,可耕地不足 10%,裸露石山面积占总土地面积的 40%以上,极易形成石漠化景观<sup>[56-57]</sup>。

#### 6.1.5 水文二维结构和水土流失

丰富的降水和高温加速了碳酸盐岩的溶蚀,形成了众多的溶洞、溶沟、溶隙、漏斗、地下河和溶水洞,地表水和地下水水文二维结构明显。从岩溶区的土壤结构看,碳酸盐岩的母岩与土壤之间缺少土壤剖面 C 层,土壤与岩石之间呈明显的刚性接触,两

者之间的亲和力和黏着力差,一旦遇上大雨,极易产生水土流失和块体滑移<sup>[58]</sup>。因此,桂西岩溶丘陵区地表径流虽小,但地表漏水严重,地面溶入系数 0.3 以上的面积占总面积的 89%,其中渗入系数 0.3—0.6 的占 69%,0.6—0.9 占 20%,首先到达地面的降水 90% 迅速渗入地下,每年剥蚀表土层 0.3 cm,水土流失相当严重<sup>[57,59-60]</sup>。

#### 6.1.6 雨热状况不均和季节性干旱

气候是喀斯特形成、演化的背景,是重要的喀斯特生态系统的驱动力。当气温大于 15℃ 时,喀斯特地区岩溶作用随着气温升高而增强<sup>[61-62]</sup>。其中,潜在、轻度石漠化与气温呈现正相关,相关系数分别为 0.82 和 0.76<sup>[11]</sup>。加上降雨集中在温度较高的 4—9 月,雨水充沛且强大,土壤侵蚀性强,气温和降雨的综合作用导致喀斯特地区土壤流失与漏失严重,从而促进石漠化形成。

喀斯特地区平均年降雨量大,但分布不均,春雨少而迟,不足年总量的 26%,秋雨不足年总量的 16%,此时日照强,蒸发量大,降水量仅为蒸发量的 38%—50%,极易形成季节性干旱,全年出现干旱现象的平均频率为 45% 左右<sup>[63]</sup>。6—8 月降水量占全年降水量的 60% 以上,且多以暴雨的形式出现,实测 24 h 最大降雨量达 395.5 mm,又加上西南喀斯特地区坡耕地面积大,雨季时正值农作物播种及生长阶段,作物不能将疏松的土壤很好地覆盖,导致坡耕地的水、土、肥随着降雨形成的地表径流流失和地下漏失,加剧了水土流失和土地石漠化的发生。

#### 6.1.7 森林结构和生物量

喀斯特独特的地质积累和气候条件决定了其适生植物具有嗜钙性、耐旱性和石生性特点,环境容量低导致物种多样性低,系统结构简单,生物量少。如木论喀斯特顶极群落常绿阔叶林群落的平均冠幅为 1.81 m,平均胸径为 6.11 cm,平均树高为 4.5 m<sup>[64]</sup>,树木矮小,绿色生物量仅为 131.42 t/hm<sup>2</sup><sup>[4]</sup>,远低于同生态位的非喀斯特森林,不及沙漠边缘或北泰加林 (150 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[65]</sup>。

### 6.2 人为因素

#### 6.2.1 人地矛盾尖锐

喀斯特生态系统的脆弱性是其退化的内在驱动力,而外在驱动力主要来自人类的干扰,二者叠加形成石漠化现象,其中人为因素是主因。人口急剧增

长、生态观念单薄、发展政策偏差等是加剧石漠化过程的重要因素。胡志斌等<sup>[66]</sup>认为某地区的人类活动与居民点、道路的分布正相关,与坡度和高程等因子负相关,根据喀斯特地区的实际情况对胡志斌的公式进行修正后得到下式<sup>[11]</sup>:

$$HAI_i = \frac{S_i \times 0.3 + R_i \times 0.3}{(K \times \lg(\text{slope}_i + 0.01) + K \times \lg(\text{ele}_i)) \times 0.4} \quad (1)$$

式中, $HAI_i$ 为*i*象元的人类活动强度, $S_i$ 为居民点影响力值, $R_i$ 为道路影响力值,居民点的影响力在 ArcGIS 中采用反距离函数(IDW)插值,道路的影响力采用线条密度函数插值得到。 $\text{slope}_i$ 为该象元的坡度值, $\text{ele}_i$ 为该象元的高程值, $K=1000$ 。运用自然裂点法将喀斯特峰丛洼地人为活动强度分为 7 级。1973 年石漠化更多的分布于 1 级和 2 级的低强度区间,说明当时石漠化主要分布在远离人类聚集的地区。随着时间的推移,2005 年较高人为活动强度区 5—7 级石漠化的分布比例提高,说明新增的石漠化土地主要在人类聚居地区发生。

西南喀斯特岩溶地区耕地少,土壤瘠薄、持水性差,生物生产力低,加之人口日益增加,人均占有粮食量低,农民易陷入“资源困境”,从而加剧了土地的反复利用和不断的毁林草开荒,形成土壤肥力日渐低下、石漠化愈加严重的生态-经济的恶性循环。而生态破坏之后,农民的“资源困境”转变为“环境困境”和“资源困境”并存,减缓了喀斯特岩溶地区的生态重建过程。在贫困地区,在生态系统良性循环阈值被突破和缺乏现代科技技术投入的双重约束下,随着人口继续增长,在原始的、传统的技术水平下,只能继续靠掠夺性开放利用资源来满足需求,形成贫困导致生态环境脆弱,生态环境脆弱反过来加剧贫困这样一种恶性循环。其结果是使石漠化面积不断扩张<sup>[69]</sup>。

#### 6.2.2 经济发展水平低

造成岩溶地貌地区石漠化的原因,除了降水、土壤等自然的内在的原因,最主要的原因还是人为的破坏加速了石漠化的形成。人为的破坏多源自经济活动,而经济活动无疑受区域的经济水平的发展控制。基于县市尺度单位,对石漠化的等级分布与不同经济密度分布进行比较分析,结果发现石漠化大多发生在经济密度<50 万元/km<sup>2</sup>的县市,随着经济

密度的增加石漠化发生率依次降低。

### 6.2.3 农业生产方式落后

西南喀斯特地区人口密度高达 172 人/km<sup>2</sup>,人口的飞速增长激化了该区域的人地矛盾,为生存起见,人类通过砍伐、垦殖、采樵、采矿、放牧、旅游开发、工程建设等各种方式对本来脆弱的喀斯特生态环境进行不断干扰和破坏,导致了该区域森林生态系统的严重退化和生物多样性的严重丧失,除人力难以达到的喀斯特顶峰悬崖峭壁等危险地带及少量的森林自然保护区外,其他地方的森林基本上已退化成灌丛和草坡,生境质量严重下降,部分地带完全石漠化<sup>[31]</sup>。据国家林业局公布的《岩溶地区石漠化状况公报》,人为因素形成的石漠化占西南喀斯特区域石漠化总面积的 74%。其中,过度樵采、不合理耕作、开垦、乱砍滥伐、过度放牧形成的石漠化面积分别占人为因素形成的石漠化面积的 31.4%、21.2%、15.1%、13.4%和 8.2%,此外,乱开矿和无序工程建设形成的石漠化占人为因素形成石漠化面积的 10.7%。

## 7 不同石漠化程度的治理策略

### (1) 无石漠化和潜在石漠化

岩石裸露率 10%—30%,地表有各种植被覆盖,植被覆盖率>60%,土被分布连续,可作为耕地,该类土地具有较好的生产效率,但存在着水土流失或植被退化等环境问题,为防止石漠化产生,应进行预防性治理,特别要注意补充和保护演替后期的繁殖体。

### (2) 轻度石漠化

岩石裸露率 30%—50%,成片分布的薄层土壤可作为耕地或草地,存在不太发育的乔灌木植被,植被覆盖率 30%—60%,该类土地生产和生态效率较低,为环境质量比较差的土地,可实施草丛→灌丛→次生林→常绿落叶阔叶林的恢复措施和步骤,充分利用灌丛恢复时期改良土壤和小气候环境,保护并适当修剪灌丛,促进有性繁殖更新链尽快恢复,为次生林群落的形成打下基础。

### (3) 中度石漠化

岩石裸露率 50%—70%,山坡还有部分土壤可作为零星耕地和草地,只有少量草灌木,植被严重退化,植被覆盖率 10%—30%,该类土地生产力和生态效率低,为环境质量差的土地,实施稀疏草丛→草丛

→草灌丛→灌丛→乔灌丛→次生林逐步恢复措施。

### (4) 重度石漠化

岩石大面积裸露,岩石裸露率大于 70%,山区无土可流失,植被严重退化为少量毛草,成为典型恶劣环境,该类土地很难利用,让其自然恢复。

## References:

- [1] Li Y B, Hou J J, Xie D T. The recent development of research on karst ecology in Southwest China. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(3): 365-370.
- [2] Chen H S, Nie Y P, Wang K L. Spatio-temporal heterogeneity of water and plant adaptation mechanisms in karst regions; a review. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(2): 317-326.
- [3] Peng W X, Wang K L, Song T Q, Zeng F P, Wang J R. Controlling and restoration models of complex degradation of vulnerable karst ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 811-820.
- [4] Song T Q, Peng W X, Zeng F P, Wang K L, Ouyang Z W. Vegetation succession rule and regeneration strategies in disturbed karst area, northwest Guangxi. *Journal of Mountain Science*, 2008, 26(5): 597-604.
- [5] Liu C Q. Biogeochemical Processes and Cycling of Nutrients in the Earth's Surface: Cycling of Nutrients in Soil-plant Systems of Karstic Environment, Southwest China. Beijing: Science Press, 2009.
- [6] Jiang Z C, Li X K, Hu B Q. Guangxi Rocky Desertification in Karst Mountain Areas and Comprehensive Management. Beijing: Science Press, 2011.
- [7] Rao Y, Wang L L, Zhao K. Rocky desertification formation and its ecological rehabilitation in Southwest China karst region. *Journal of China West Normal University: Natural Sciences*, 2004, 25(4): 440-443.
- [8] Zhang X B, Wang S J, He X B, Wang Y C, Wen A B. A preliminary discussion on the rocky desertification classification for slope land in karst mountain areas of Southwest China. *Earth and Environment*, 2007, 35(2): 188-192.
- [9] Xiong K N. The Study of Karst Rocky Desertification Using the GIS & RS Technology. Beijing: Geology Press, 2002.
- [10] Wang S J, Li Y B, Li R L. Karst rocky desertification: formation background, evolution and comprehensive taming. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(6): 657-666.
- [11] Yang Q Q. Spatio-temporal Evolution and Its Driving Forces of Karst Rocky Desertification in Northwest Guangxi Based on RS and GIS [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [12] Hao Y H, Cao B B, Zhang P C, Wang Q Y, Li Z T, Yeh T J. Differences in karst processes between northern and southern

- China. Carbonates and Evaporites, 2012, 27(3/4): 331-342.
- [13] Zhang M Y, Wang K L, Zhang C H, Chen H S, Liu H Y, Yue Y M, Luffman I, Qi X K. Using the radial basis function network model to assess rocky desertification in northwest Guangxi, China. Environmental Earth Science, 2011, 62(1): 69-76.
- [14] Song T Q, Peng W X, Zeng F P, Wang K L, Liu L, Lu S Y, Du H. Soil ecological effects of converting cropland to forest and grassland in depressions between karst hills. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(6): 1219-1226.
- [15] Peng W X, Song T Q, Zeng F P, Wang K L, Du H, Lu S Y. Models of vegetation and soil coupling coordinative degree in grain for green project in depressions between karst hills. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(9): 305-310.
- [16] Lu S Y, Peng W X, Song T Q, Zeng F P, Du H, Wang K L. Soil microbial properties under different grain-for-green patterns in depressions between karst hills. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(8): 2390-2399.
- [17] Cao J H, Yuan D X, Tong L Q. Features of Karst ecosystem and integrating measure for rock desertification in Southwest China. Pratacultural Science, 2008, 25(9): 40-50.
- [18] Guo K, Liu C C, Dong M. Ecological adaptation of plants and control of rocky-desertification on karst region of South-west China. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(10): 991-999.
- [19] Wang M Y, Chen B, Rong L. Indicative research on restoration of the forest vegetation in rocky desertification-affected karst areas, Puding County, Guizhou province. Earth and Environment, 2010, 38(2): 202-206.
- [20] Yuan D X. Global view on Karst rock desertification and integrating control measures and experiences of China. Pratacultural Science, 2008, 25(9): 19-25.
- [21] Zhu Z D. The status and prospect desertification in China. Acta Geographica Sinica, 1994, 49(Suppl): 650-659.
- [22] Zhu Z D, Cui S H. The problem of desertification in South China. Journal of Desert Research, 1996, 16(4): 331-337.
- [23] Yuan D X. On the environmental and geologic problems of karst mountains and rocks in the south-west China. World Sci-Tech R and D, 1997, 19(5): 41-43.
- [24] Luo Z K. Preliminary evaluation of ecological and environmental construction and protection of desertification in Karst region in Guizhou. Guizhou Science and Technology of Environmental Protection, 2000, 6(1): 7-10.
- [25] Wang S J. Concept deduction and its connotation of karst rocky desertification. Carsologica Sinica, 2002, 21(2): 101-105.
- [26] Song T Q, Peng W X, Zeng F P, Wang K L, Qin W G, Tan W N, Liu L, Du H, Lu S Y. Spatial pattern of forest communities and environmental interpretation in Mulun National Nature Reserve, karst cluster-peak depression region. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(3): 298-308.
- [27] Du H, Peng W X, Song T Q, Zeng F P, Wang K L, Song M, Zhang H. Spatial pattern of woody plants and their environmental interpretation in the karst forest of southwest China. Plant Biosystems, 2013, doi:10.1080/11263504.2013.796019.
- [28] Du H, Peng W X, Song T Q, Wang K L, Zeng F P, Lu S Y, Shi W W, Tang C, Tan Q J. Plant community characteristics and its coupling relationships with soil in depressions between karst hills, North Guangxi, China. Chinese Journal of Plant Ecology, 2013, 37(3): 197-208.
- [29] Peng W X, Song T Q, Zeng F P, Wang K L, Fu W, Liu L, Du H, Lu S Y, Yin Q C. The coupling relationships between vegetation, soil, and topography factors in Karst mixed evergreen and deciduous broadleaf forest. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(13): 3472-3481.
- [30] Peng W X, Song T Q, Zeng F P, Wang K L, Du H, Lu S Y. Relationships between woody plants and environmental factors in karst mixed evergreen-deciduous broadleaf forest, southwest China. International Journal of Food, Agricultural and Environment, 2012, 10(1): 890-896.
- [31] Zeng F P, Peng W X, Song T Q, Wang K L, Wu H Y, Song X J, Zeng Z X. Changes in vegetation after 22 years' natural restoration in the karst disturbed area in Northwest Guangxi. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5110-5119.
- [32] Xu Y, Long J. Effect of soil physical properties on soil erosion in Guizhou karst mountainous region. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(1): 157-159.
- [33] Yu Y. Calcareous Soil Aggregate Stability and Calcareous Soil Organic Carbon Characteristics under Different Typical Ecosystems in Karst Peak-Cluster Depression Area of Northwest Guangxi, China [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [34] Yu Y F, Lu L X, Du H, Peng W X, Zeng F P, Song T Q. Distribution of organic carbon and aggregation of calcareous Soil in different forest types. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2013, 33(5): 1011-1019.
- [35] Liu L, Zeng F P, Song T Q, Peng W X, Wang K L, Qin W G, Tan W N. Spatial heterogeneity of soil nutrients in Karst area's, Mulun National Nature Reserve. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(7): 1667-1673.
- [36] Ouyang Z W, Peng W X, Song T Q, Zeng F P, Wang K L, Wu H Y. Spatial heterogeneity of soil organic matter and its response to disturbance in Karst peak cluster depressions. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(6): 1329-1336.
- [37] Zhang W, Chen H S, Wang K L, Zhang J G, Hou Y. Effects of planting pattern and bare rock ratio on spatial distribution of soil nutrients in Karst depression area. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(7): 1459-1463.
- [38] Zhang W, Chen H S, Wang K L, Hou Y, Zhang J G. Spatial variability of soil organic carbon and available phosphorus in a

- typical Karst depression, northwest of Guangxi. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 5168-5175.
- [39] Song M, Peng W X, Zou D S, Zeng F P, Du H, Lu S Y. The causes of spatial variability of surface soil organic matter in different forests in depressions between karst hills. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(19): 6259-6269.
- [40] Guo M, An S S, Chang Q R, Li B C. Characteristics of soil ferric oxide and mineral elements in Hilly-gully Area of Southern Ningxia. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 12(3): 38-40.
- [41] Du H, Song T Q, Peng W X, Wang K L, Liu L, Lu S Y, Zeng F P. Spatial heterogeneity of mineral compositions in surface soil in Mulun National Nature reserve Karst areas. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(6): 79-84.
- [42] Han M R, Song T Q, Peng W X, Huang G Q, Du H, Lu S Y, Shi W W. Compositional characteristics and roles of soil mineral substances in depressions between hills in karst region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(3): 685-693.
- [43] Long J, Li J, Jiang X R, Huang C Y. Soil microbial activities in Maolan karst forest, Guizhou Province. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4): 597-602.
- [44] Jenkinson D S, Andrew S P S, Lynch J M, Goss M J, Tinker P B. The turnover of the organic carbon and nitrogen in soil. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, 1990, 329(1255): 361-367.
- [45] Wu J, Brookes P C, Jenkinson D S. Formation and destruction of microbial biomass during the decomposition of glucose and ryegrass in soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 1993, 25(10): 1435-1441.
- [46] Liu S L, Xiao H A, Tong C L, Wu J S. Microbial Biomass C, N and P and their responses to application of inorganic and organic fertilizers in subtropical paddy soils. *Research of Agricultural Modernization*, 2003, 24(4): 278-283.
- [47] Chen G C, He Z L. Study on microbial biomass in red soil under different land use types. *Chinese Journal of Soil Science*, 1998, 29(6): 276-278.
- [48] Anderson J P E, Domsch K H. Quantities of plant nutrients in the microbial biomass of selected soils. *Soil Science*, 1980, 130: 211-216.
- [49] Liu L, Song T Q, Peng W X, Wang K L, Du H, Lu S Y, Zeng F P. Spatial heterogeneity of soil microbial biomass in Mulun National Nature Reserve in Karst area. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(1): 207-214.
- [50] Lu C Y, Peng W X, Song T Q, Zeng F P, Yang Y R, Zhang H, Lu S Y, Du H. Coupling relationships between soil microbe and soil nutrient under different ecosystems in depression between karst hills. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(3): 522-528.
- [51] Zhang L Q, Peng W X, Song T Q, Zou D S, Zeng F P, Song M, Yu Z, Liu Y. Spatial heterogeneity of soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus in sloping farmland in a karst region on the Yunnan-Guizhou Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(7): 2056-2065.
- [52] Zhang D F, Wang S J, Zhou D Q, Li R L. Intrinsic driving mechanism of land rocky desertification in karst regions of Guizhou province. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2001, 21(4): 1-5.
- [53] Weng J T. The effect of carbonate rocks on global carbon cycle. *Advance in Earth Sciences*, 1995, 10(2): 154-158.
- [54] Wang M Z, Wang S Y. Study on the Eco-geo-environment of Karst Hills in Guizhou Province. Beijing: Geology Press, 2005.
- [55] Li R L, Wang S J, Zhou D Q, Zhang D F, Li F Q, Zhou Z F, Xiong K N. The correlation between rock desertification and lithology in karst area of Guizhou. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(2): 314-320.
- [56] Jiang Z C, Yuan D X. Features of Karst dynamic on epikarst and its environment and resources significance. *Journal of the Earth*, 1999, 20(3): 302-308.
- [57] Yuan D X. Karst and the global change research. *Advance in Earth Science*, 1995, 10(5): 471-474.
- [58] Cao J H, Yuan D X, Zhang C, Jiang Z C. Karst ecosystem constrained by geological conditions in southwest China. *Earth and Environment*, 2004, 32(1): 1-8.
- [59] Yuan D X. Progress in the study on karst processes and carbon cycle. *Advance in Earth Science*, 1999, 14(5): 425-432.
- [60] He T B. Status of soil and water loss and counter measures of ecological agriculture construction in Guizhou Karst mountainous region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(5): 28-34.
- [61] Yuan D X. The Karst Study of China. Beijing: Geology Press, 1993.
- [62] Cao J H, Yuan D X. Karst Ecosystem of Southwest China Constrained by Geological Setting. Beijing: Geology Press, 2005.
- [63] Zhou Y Y, Jiang Z C, Wei Z L. Rational study on the drought and the cause of drought in central Guangxi Karst Agricultural area. *Carsologica Sinica*, 2003, 22(2): 144-149.
- [64] Peng W X. Study on Patterns of Forest Vegetation and Its Maintenance Mechanism in Karst Peak-cluster-depression Region [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2009.
- [65] Yang H K. Discussion on variation of Karst environmental quality // Xie Y H, Yang M D. Human Activity and Karst Environment. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1994: 1-7.
- [66] Hu Z B, He X Y, Li Y H, Zhu J J, Li X Y. Human activity intensity and its spatial distribution pattern in upper reach of Minjiang River. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(4): 539-543.
- [67] Zhang L S, Fang X Q, Ren G Y, Suo X F. Environmental changes in the north china farming-grazing transitional zone. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing)*,

1997, 4(1/2): 127-136.

- [68] Shi D K. The special role of the borders between farming and ranging regions in the sustainable development strategies. *Acta Agrestia Sinica*, 1999, 6(1): 17-21.
- [69] Wang K L, Zeng F P, Song T Q, Peng W X. Comprehensive harnessing and ecological restoration models for Karst mountain area in West Guangxi// Sun B. Resistance Control and Ecological Restoration of Red Soil Degradation. Beijing: Scientific Press, 2011: 404-466.

#### 参考文献:

- [1] 李阳兵, 侯建筠, 谢德体. 中国西南岩溶生态研究进展. *地理科学*, 2002, 22(3): 365-370.
- [2] 陈洪松, 聂云鹏, 王克林. 岩溶山区水分时空异质性及植物适应机理研究进展. *生态学报*, 2013, 33(2): 317-326.
- [3] 彭晚霞, 王克林, 宋同清, 曾馥平, 王久荣. 喀斯特脆弱生态系统复合退化控制与重建模式. *生态学报*, 2008, 28(2): 811-820.
- [4] 宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 王克林, 欧阳资文. 桂西北喀斯特人为干扰区植被的演替规律与更新策略. *山地学报*, 2008, 26(5): 597-604.
- [5] 刘丛强. 生物地球化学过程与地表物质循环: 西南喀斯特土壤-植被系统生源要素循环. 北京: 科学出版社, 2009.
- [6] 蒋忠诚, 李先坤, 胡宝清. 广西岩溶山区石漠化及其综合治理研究. 北京: 科学出版社, 2011.
- [7] 饶懿, 王丽丽, 赵珂. 西南岩溶山区石漠化成因及其生态恢复对策. *西华师范大学学报: 自然科学版*, 2004, 25(4): 440-443.
- [8] 张信宝, 王世杰, 贺秀斌, 汪阳春, 文安邦. 西南岩溶山地坡地石漠化分类刍议. *地球与环境*, 2007, 35(2): 188-192.
- [9] 熊康宁. 喀斯特石漠化的遥感-GIS 典型研究——以贵州省为例. 北京: 地质出版社, 2002.
- [10] 王世杰, 李阳兵, 李瑞玲. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理. *第四纪研究*, 2003, 23(6): 657-666.
- [11] 杨青青. 基于 RS 和 GIS 的桂西北喀斯特石漠化的时空演变及驱动机制 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
- [14] 宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 王克林, 刘璐, 鹿士杨, 杜虎. 喀斯特峰丛洼地退耕还林还草的土壤生态效应. *土壤学报*, 2011, 48(6): 1219-1226.
- [15] 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 王克林, 杜虎, 鹿士杨. 喀斯特峰丛洼地退耕还林还草工程的植被土壤耦合协调度模型. *农业工程学报*, 2011, 27(9): 305-310.
- [16] 鹿士杨, 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 杜虎, 王克林. 喀斯特峰丛洼地不同退耕还林还草模式土壤微生物特性的变化. *生态学报*, 2012, 32(8): 2390-2399.
- [17] 曹建华, 袁道先, 童立强. 中国西南岩溶生态系统特征与石漠化综合治理对策. *草业科学*, 2008, 25(9): 40-50.
- [18] 郭柯, 刘长成, 董鸣. 我国西南喀斯特植物生态适应性及石漠化治理. *植物生态学报*, 2011, 35(10): 991-999.
- [19] 王明云, 陈波, 容丽. 普定喀斯特石漠化地区森林植被恢复示范研究. *地球与环境*, 2010, 38(2): 202-206.
- [20] 袁道先. 岩溶石漠化问题的全球视野和我国的治理对策与经验. *草业科学*, 2008, 25(9): 19-25.
- [21] 朱震达. 中国荒漠化问题研究的现状与展望. *地理学报*, 1994, 49(增刊): 650-659.
- [22] 朱震达, 崔书红. 中国南方的土地荒漠化问题. *中国沙漠*, 1996, 16(4): 331-337.
- [23] 袁道先. 我国西南岩溶石山的环境地质问题. *世界科技研究与发展*, 1997, 19(5): 41-43.
- [24] 罗中康. 贵州喀斯特地区荒漠化防治与生态环境建设浅议. *贵州环保科技*, 2000, 6(1): 7-10.
- [25] 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨. *中国岩溶*, 2002, 21(2): 101-105.
- [26] 宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 王克林, 覃文更, 谭卫宁, 刘璐, 杜虎, 鹿士杨. 木论喀斯特峰丛洼地森林群落空间格局及环境解释. *植物生态学报*, 2010, 34(3): 298-308.
- [28] 杜虎, 彭晚霞, 宋同清, 王克林, 曾馥平, 鹿士杨, 时伟伟, 唐成, 谭秋锦. 桂北喀斯特峰丛洼地植物群落特征及其与土壤的耦合关系. *植物生态学报*, 2013, 37(3): 197-208.
- [29] 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 王克林, 傅伟, 刘璐, 杜虎, 鹿士杨, 殷庆仓. 喀斯特常绿落叶阔叶混交林植物与土壤地形因子的耦合关系. *生态学报*, 2010, 30(13): 3472-3481.
- [31] 曾馥平, 彭晚霞, 宋同清, 王克林, 吴海勇, 宋希娟, 曾昭霞. 桂西北喀斯特人为干扰区植被自然恢复 22 年后群落特征. *生态学报*, 2007, 27(12): 5110-5119.
- [32] 徐燕, 龙健. 贵州喀斯特山区土壤物理性质对土壤侵蚀的影响. *水土保持学报*, 2005, 19(1): 157-159.
- [33] 于扬. 桂西北喀斯特峰丛洼地典型生态系统石灰土团聚体稳定性及有机碳特征 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [34] 俞月凤, 卢凌霄, 杜虎, 彭晚霞, 曾馥平, 宋同清. 不同类型森林石灰土的团聚体组成及其有机碳分布特征. *西北植物学报*, 2013, 33(5): 1011-1019.
- [35] 刘璐, 曾馥平, 宋同清, 彭晚霞, 王克林, 覃文更, 谭卫宁. 喀斯特木论自然保护区土壤养分的空间变异特征. *应用生态学报*, 2010, 21(7): 1667-1673.
- [36] 欧阳资文, 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 王克林, 吴海勇. 喀斯特峰丛洼地土壤有机质的空间变化及其对干扰的响应. *应用生态学报*, 2009, 20(6): 1329-1336.
- [37] 张伟, 陈洪松, 王克林, 张继光, 侯娅. 种植方式和裸岩率对喀斯特洼地土壤养分空间分异特征的影响. *应用生态学报*, 2007, 18(7): 1459-1463.
- [38] 张伟, 陈洪松, 王克林, 侯娅, 张继光. 桂西北喀斯特洼地土壤有机碳和速效磷的空间变异. *生态学报*, 2007, 27(12): 5168-5175.
- [39] 宋敏, 彭晚霞, 邹冬生, 曾馥平, 杜虎, 鹿士杨. 喀斯特峰丛洼地不同森林表层土壤有机质的空间变异及成因. *生态学报*, 2012, 32(19): 6259-6269.
- [40] 郭曼, 安韶山, 常庆瑞, 李璧成. 宁南宽谷丘陵区土壤矿质元

- 素与氧化铁的特征. 水土保持学报, 2005, 12(3): 38-40.
- [41] 杜虎, 宋同清, 彭晚霞, 王克林, 刘璐, 鹿士杨, 曾馥平. 木论喀斯特自然保护区表层土壤矿物质的空间异质性. 农业工程学报, 2011, 27(6): 79-84.
- [42] 韩美荣, 宋同清, 彭晚霞, 黄国勤, 杜虎, 鹿士杨, 时伟伟. 喀斯特峰丛洼地土壤矿物质的组成特征与作用. 应用生态学报, 2012, 23(3): 685-693.
- [43] 龙健, 李娟, 江新荣, 黄昌勇. 贵州茂兰喀斯特森林土壤微生物活性的研究. 土壤学报, 2004, 41(4): 597-602.
- [46] 刘守龙, 肖和艾, 童成立, 吴金水. 亚热带稻田土壤微生物生物量碳、氮、磷状况及其对施肥的反应. 农业现代化研究, 2003, 24(4): 278-283.
- [47] 陈国潮, 何振立. 红壤不同利用方式下的微生物量研究. 土壤通报, 1998, 29(6): 276-278.
- [49] 刘璐, 宋同清, 彭晚霞, 王克林, 杜虎, 鹿士杨, 曾馥平. 木论喀斯特自然保护区土壤微生物生物量的空间格局. 生态学报, 2012, 32(1): 207-214.
- [50] 卢成阳, 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 杨钙仁, 张浩, 鹿士杨, 杜虎. 喀斯特峰丛洼地不同生态系统土壤微生物与养分的耦合关系. 生态学杂志, 2013, 32(3): 522-528.
- [51] 张利青, 彭晚霞, 宋同清, 邹冬生, 曾馥平, 宋敏, 俞孜, 刘艳. 云贵高原喀斯特坡耕地土壤微生物量 C、N、P 空间分布. 生态学报, 2012, 32(7): 2056-2065.
- [52] 张殿发, 王世杰, 周德全, 李瑞玲. 贵州省喀斯特地区土地石漠化的内动力作用机制. 水土保持通报, 2001, 21(4): 1-5.
- [53] 翁金桃. 碳酸盐岩在全球碳循环过程中的作用. 地球科学进展, 1995, 10(2): 154-158.
- [54] 王明章, 王尚彦. 贵州岩溶石山生态地质环境研究. 北京: 地质出版社, 2005.
- [55] 李瑞玲, 王世杰, 周德全, 张殿发, 李凤全, 周忠发, 熊康宁. 贵州岩溶地区岩性与土地石漠化的相关分析. 地理学报, 2003, 58(2): 314-320.
- [56] 蒋忠诚, 袁道先. 表层岩溶带的岩溶动力学特征及其环境和资源意义. 地球学报, 1999, 20(2): 302-308.
- [57] 袁道先. 岩溶与全球变化研究. 地球科学进展, 1995, 10(5): 471-474.
- [58] 曹建华, 袁道先, 章程, 蒋忠诚. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统. 地球与环境, 2004, 32(1): 1-8.
- [59] 袁道先. “岩溶作用与碳循环”研究进展. 地球科学进展, 1999, 14(5): 425-432.
- [60] 何腾兵. 贵州喀斯特山区水土流失状况及生态农业建设途径探讨. 水土保持学报, 2000, 14(5): 28-34.
- [61] 袁道先. 中国岩溶学. 北京: 地质出版社, 1993.
- [62] 曹建华, 袁道先. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统. 北京: 地质出版社, 2005.
- [63] 周游游, 蒋忠诚, 韦珍莲. 广西中部喀斯特干旱农业区的干旱程度及干旱成因分析. 中国岩溶, 2003, 22(2): 144-149.
- [64] 彭晚霞. 喀斯特峰丛洼地森林植被空间分布格局及其维持机制研究 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2009.
- [65] 杨汉奎. 论喀斯特环境质量变异 // 谢云鹤, 杨明德. 人类活动与岩溶环境. 北京: 北京科学技术出版社, 1994: 1-7.
- [66] 胡志斌, 何兴元, 李月辉, 朱教君, 李小玉. 岷江上游地区人类活动强度及其特征. 生态学杂志, 2007, 26(4): 539-543.
- [67] 张兰生, 方修琦, 任国玉, 索秀芬. 我国北方农牧交错带的环境演变. 地学前缘(中国地质大学, 北京), 1997, 4(1-2): 127-136.
- [68] 史德宽. 农牧交错带在持续发展战略中的特殊地位. 草地学报, 1999, 6(1): 17-21.
- [69] 王克林, 曾馥平, 宋同清, 彭晚霞. 桂西岩溶丘陵区石山综合治理与生态修复模式 // 孙波. 红壤退化阻控与生态修复. 北京: 科学出版社, 2011: 404-466.