

花椒林在喀斯特石漠化治理中的碳汇效益

杨龙^{1,2}, 熊康宁^{1,2}, 肖时珍^{1,2}, 蓝家程^{1,2}, 敖向红^{1,2}

(1. 贵州师范大学 中国南方喀斯特研究院, 贵州 贵阳 550001;

2. 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550001)

摘要: [目的] 评价石漠化地区花椒林的碳汇功能, 为石漠化治理工程的碳汇效益提供技术示范与参考。[方法] 以贵州省花江喀斯特石漠化治理示范区生态环境综合治理模式下顶坛花椒 (*Zanthoxylum planispinum*) 为研究对象, 依据当地的石漠化现状, 通过测定强度、中度和轻度石漠化和不同龄级的花椒林生物量、土壤深度和持土量, 对花椒林碳汇量进行估算。[结果] 石漠化程度越高, 花椒林碳汇量越低, 反之, 石漠化程度越低, 花椒林碳汇量越大, 其中轻度石漠化花椒林碳密度为 3.24 t/hm², 中度石漠化为 3.12 t/hm², 强度石漠化为 2.81 t/hm², 轻度 > 中度 > 强度; 随着土壤深度和持土量的增加, 花椒林碳汇量也呈现增加的趋势。[结论] 花椒林的平均碳密度为 3.06 t/hm², 花椒林的综合最优碳汇经济效益为 1.92 × 10⁴ ~ 2.56 × 10⁴ 元/hm²。

关键词: 喀斯特石漠化; 花椒; 花江示范区; 碳汇

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)01-0292-06

中图分类号: F326.25

文献参数: 杨龙, 熊康宁, 肖时珍, 等. 花椒林在喀斯特石漠化治理中的碳汇效益[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 292-297. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.01.052

Carbon Sequestration Benefits of *Zanthoxylum Bungeanum* Forest in Karst Rocky Desertification Treatment Areas

YANG Long^{1,2}, XIONG Kangning^{1,2}, XIAO Shizhen^{1,2}, LAN Jiacheng^{1,2}, AO Xianghong^{1,2}

(1. Institute of South China Karst, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550001, China;

2. State Engineering Technology Center for Karst Rocky Desertification Rehabilitation, Guiyang, Guizhou 550001, China)

Abstract: [Objective] The objective of this study is to analyze the carbon sequestration benefits of *Zanthoxylum bungeanum* forest in order to provide support for the benefits assessment of karst rocky desertification control projects. [Methods] *Z. bungeanum* in Huajiang karst rocky desertification treatment demonstration site was chosen as the research object. The biomass, soil depth and soil holding capacity of *Z. bungeanum* forests with different forest ages were investigated in different rocky desertification areas (intensive, moderate and light desertification intensity). The carbon sequestration benefits of *Z. bungeanum* forests were then estimated. [Results] It was found that the carbon sequestration decreased with the increase of the desertification intensity. The carbon density of *Z. bungeanum* forest in light rocky desertification areas was 3.24 t/hm², while it respectively was 3.12 and 2.81 t/hm² in moderate and intensive rocky desertification areas. With the increase of the soil depth and soil hold capacity, the carbon sequestration of *Z. bungeanum* forest increased. [Conciusion] The average carbon density of *Z. bungeanum* forest was 3.06 t/hm², and the optimal carbon sink economic benefits was 19.2 thousand yuan of per hectare to 25.6 thousands yuan of per hectare.

Keywords: karst rocky desertification; *Zanthoxylum bungeanum*; Huajiang demonstration site; carbon sequestration

中国西南地区是世界上面积最大、最集中连片的喀斯特区^[1]。目前, 以喀斯特石漠化为主的一系列生

态环境问题已经成为中国西南岩溶石山地区迫切需要解决的、严重威胁到区域社会经济可持续发展、并

收稿日期: 2014-10-21

修回日期: 2014-12-09

资助项目: “十二五”科技支撑计划重大课题“喀斯特高原峡谷石漠化综合治理技术与示范”(2011BAC09B01); “国家自然科学基金西南典型岩溶区石漠化综合治理对岩溶作用的影响机制及其碳汇效应: 以贵州花江为例”(41201565); 贵州省科技计划课题(黔科合 SY 字 [2011]3087)

第一作者: 杨龙(1992—), 男(汉族), 贵州省贵阳市人, 硕士研究生, 研究方向为喀斯特旅游资源评价与开发。E-mail: 939975692@qq.com。

通讯作者: 熊康宁(1958—), 男(汉族), 贵州省贵阳市人, 硕士, 教授, 博士生导师, 主要从事喀斯特洞穴与石漠化治理研究。E-mail: 584572163@qq.com。

对区域气候产生一定影响的重大环境问题。从“九五”开始,国家开始重视和研究石漠化问题,“十五”开始把石漠化作为一个生态问题来治理^[2]。“十一五”期间,国家加大投入,安排专项资金,在云南、贵州、广西、湖南、湖北、重庆、四川、广东 8 省(区、市)100 个县开展石漠化综合治理试点工作。到如今的“十二五”,国家继续扩大资金投入,新增 100 个石漠化综合治理重点县^[3]。而全球气候变化问题则赋予了喀斯特石漠化治理更多、更深的意义。从石漠化的定义可知^[4],石漠化是一种因植被破坏导致水土流失、基岩裸露的生态系统逆演化过程,植被的破坏和水土流失都会增加陆地生态系统 CO₂ 的排放,然而通过石漠化综合治理,可以有效地控制甚至扭转石漠化生态系统逆演化过程,使不同程度的石漠化土地得到恢复。国家的重大科研计划对石漠化的改善起到了重大作用,在《石漠化综合治理规划大纲(2006—2015)》中,大纲强调把石漠化治理的碳汇效应设作为石漠化治理的重点内容^[5]。可见,喀斯特地区的石漠化治理和碳汇效应是相辅相成的。但是,关于喀斯特石漠化地区花椒林的研究多以其经济价值、生物量、生长状况以及保水固土等为主,而花椒作为喀斯特石漠化治理的优势物种,对其治理石漠化的碳汇效益的研究却较少^[6-8]。本研究以“十二五”科技支撑计划重大课题“喀斯特高原峡谷石漠化综合治理技术与示范”的两个示范区之一贵州关岭—贞丰花江示范区的花椒林为对象,利用已建立的林木生物量模型,结合林木生物量的测定,估算该区典型经济林(花椒林)的碳储量和碳汇效益,以期为该地区花椒林碳汇功能的评价和石漠化治理工程的碳汇估算及评价提供技术示范与参考。

1 研究区概况

关岭—贞丰花江喀斯特高原峡谷中—强度石漠

化综合治理示范区(花江示范区)位于贵州省西南部,关岭县以南、贞丰县以北的北盘江花江峡谷两岸,辖北盘江镇的水淹坝、擦耳岩、云洞湾和板贵乡的木工、坝山、三家寨、孔落箐共 8 个行政村以及花江镇五里村的法郎、甘二盘 2 个村民组。示范区总面积 51.62 km²,其中喀斯特面积占总面积的 87.92%,石漠化面积 36.8 km²,其中潜在、轻度、中度、强度(含极强度)^[1]石漠化面积分别占示范区总面积的 21.60%, 34.87%, 10.80%, 9.16%。区内海拔 500~1 200 m,相对高差 700 m,是贵州高原上一个典型的喀斯特高原峡谷区。区内年均温 18.4 ℃,年均极端最高气温为 32.4 ℃,≥0 ℃积温 6 542 ℃,年降水量 1 100 mm,气候冬春温暖干旱,夏秋湿热,2010 年,总人口 8 612 人,其中农业人口占 89.7%,农业人口密度 150 人/km²。顶坛花椒根系发达,具有适应性强、耐旱、易管理的特点,能保水固土,是生物措施治理石漠化、恢复和重建喀斯特脆弱生态和防止水土流失的重要经济树种,在研究区大面积种植。

2 研究方法与样地选择

2.1 样地选择与设置

目前,石漠化等级划分主要有 6 种方案^[9-14],但评价体系亦存在如下问题^[15]:① 没有考虑到土地利用这一主要影响因子;② 选取评价标准多为作者经验数据,缺乏科学理论依据;③ 评价指标多表现为空间的单一性;④ 注重地表形态特征,忽视石漠化的本质过程。经比较几种方案后可以发现,熊康宁等在进行喀斯特石漠化等级划分时,在从综合的角度考虑到石漠化的景观生态学特征的同时还兼顾了农业利用价值等因素,划分方案综合性强,具有可操作性,特别适用于石漠化防治初期阶段,因此,可以把其作为度量石漠化等级的依据^[4]。划分石漠化等级的具体参数见表 1。

表 1 纯碳酸盐岩喀斯特区石漠化强度分级标准

强度等级	评价因子					
	基岩裸露/%	土被/%	坡度/(°)	植被+土被/%	土层平均厚度/cm	农业利用价值
无明显石漠化	<40	>60	<15	>70	>20	宜水保措施的农用
潜在石漠化	>40	<60	>15	50—70	<20	宜林牧
轻度石漠化	>60	<30	>18	35—50	<15	临界宜林牧
中度石漠化	>70	<20	>22	20—35	<10	难利用地
强度石漠化	>80	<10	>25	10—20	<5	难利用地
极强度石漠化	>90	<5	>30	<10	<3	无利用价值

在花江示范区的擦耳岩村大石板(25°40′27.66″N, 105°39′22.97″E;海拔 597 m;中度石漠化)、擦耳岩村

水井湾(25°40′26″N,105°39′22″E;海拔 706,713,763, 731 m 这 4 个样地;轻度石漠化)、擦耳岩村赵家水井

(25°40′25.71″N, 105°39′21.49″E; 海拔 841 m; 强度石漠化)6 个不同等级石漠化样地内设置 6 块(20 m × 20 m)花椒种植标准样地供研究, 其中大石板和赵家水井各一个树龄为 6 a 的样地, 水井湾选择树龄为 1, 3, 6, 10 a 的样地各一个(表 2)。

表 2 研究样地基本情况

样地	地貌	评价因子				
		海拔/ m	生长期/a	土壤深度/cm	坡度/ (°)	石漠化等级
1	槽谷	706	1	101	22	轻度
2	槽谷边坡	713	3	114	22	轻度
3	槽谷边坡	732	6	117	19	轻度
4	槽谷边坡	763	10	109	24	轻度
5	侵蚀沟谷	841	6	76	25	中度
6	溶沟石牙	597	6	56	30	强度

2.2 研究方法

生物量法是目前应用最为广泛的方法, 其优点就是直接、明确、技术简单, 即采用根据单位面积生物量、森林面积、生物量在树木各器官中的分配比例、树木各器官的平均碳含量等参数计算而成。最早应用生物量法时, 是将森林通过大规模的实地调查, 得到实测的数据, 建立一套标准的测量参数和生物量数据库, 用样地数据得到植被的平均碳密度, 然后用每一种植被的碳密度与面积相乘, 估算生态系统的碳储量^[16-17]。

在本文中研究中采取的生物量法主要测定了样地中花椒树的基径、株高等指标, 并将花椒树的干、叶、根取样, 称取鲜重, 再带回实验室烘干(105 °C, 48 h)至恒重称其干重, 以获取其干生物量^[18]。在中国一般木本植物含碳率取 0.5, 灌木、草本植物或农作物则取 0.45^[19]。因此花椒树的碳密度取 0.45。灌木生物量主要根据各样地中不同植物的平均基径和平均高度而定。运用以下公式计算^[20]:

$$W_{\text{灌}} = 0.0495(D^2 H)^{0.07402} \quad (1)$$

式中: $W_{\text{灌}}$ ——地上部分生物量(g/cm²); D ——作物平均基径(cm); H ——作物平均高度(m)。下同。

而灌木层生物量包括地上部分和地下根系部分, 在测量灌木层生物量的时候求出的 $W_{\text{灌}}$ 为地上部分的生物量, 所以根据马钦彦等^[21]对华北主要森林类型建群种各组分的含碳率研究, 发现灌木丛地上部分平均含碳率与根系含碳率之比为 1 : 0.992^[22], 因此, 本文中灌木层地下部分碳密度取值为 0.43。

地下部分生物量采取砍伐法, 共计伐木 5 株, 挖去花椒树树根称量树根鲜重与地上部分鲜重, 并得出地上生物量与地下生物量各自所占整株植物质量的

比例, 最后得出平均地下生物量约为地表生物量的 8.261%(如表 3 所示)。因此, 其全部生物量则为:

$$W_{\text{总}} = W_{\text{灌}}(1 + 9.349\%) \quad (2)$$

式中: $W_{\text{总}}$ ——植被总生物量(g/cm²)。下同。

表 3 花椒林地上地下生物量比例

植物编号	生物量		
	地上部分 鲜重/kg	地下部分 鲜重/kg	地下部分与地上 部分的比例/%
1	11.473	1.091	9.509
2	18.436	1.834	9.947
3	17.826	1.388	7.786
4	18.047	1.752	9.707
5	19.113	1.806	9.449
均值	16.797	1.574	9.349

碳储量计算公式为:

$$C = W_{\text{灌}} \times 0.45 + 0.09349 \times W_{\text{灌}} \times 0.43 \quad (3)$$

式中: C ——碳储量(g/cm²)。

3 结果与分析

3.1 不同生长期花椒林碳汇量变化分析

在林分生长发育的不同阶段, 林下植被的物种组成和数量都有很大的变化^[23]。森林群落不同演替阶段的植被的物种数量及生物量有着较大的差异^[24]。本文研究发现, 在近乎相同的立地条件下, 不同龄级花椒的生物量及碳汇量之间存在较大差异, 其中 1, 3, 6, 10 a 的花椒的生物量分别为 0.513, 0.631, 0.719, 0.743 kg/m², 碳汇量分别为 2.39, 2.84, 3.24, 3.34 t/hm²。随着生长年份的增加, 花椒林的碳汇量也呈现明显增加的趋势, 其中 1~6 a 增加速度明显要高于 6~10 a 的, 但碳汇量最大的还是 10 a 的花椒林。龙成昌等^[25]研究发现, 花江地区 1~10 a 的花椒生物量增长速率 1~3 a > 3~5 a > 大于 9~10 a > 5~8 a, 植物生长速率大致趋势与本次研究得出的结果相符合(表 4)。

表 4 水井湾不同龄级花椒生物量状况

生长期/ a	评价指标				
	株高/ m	基径/ cm	土深/ m	生物量/ (g · cm ⁻²)	碳汇量/ (t · hm ⁻²)
1	1.02	1.6	1.04	513.446 7	2.39
3	1.82	3.81	1.02	630.747 9	2.84
6	2.7	7.57	1.17	718.912 6	3.24
10	3.2	8.64	1.35	743.299 9	3.34

3.2 不同土壤深度花椒林碳汇量变化分析

立地条件对植物生物量的影响主要是通过其对持土量、土壤有机质和土壤深度的差异分布而引起

的^[26]。在相同种苗、栽培措施和管理条件下,立地条件与植物生长量有密切关系,立地条件越好,生物量越大^[27]。不同立地条件之间土层厚度存在差异,因而土壤水分、养分状况等不同,植物的生长状况也各不相同。龙成昌等通过测定花江地区 1~10 龄的单株花椒的冠幅、株高、地径及其生长土壤的土量、土深等指标,对花椒组各指标与土壤组各指标进行单相关分析,结果表明,花椒总体生长状况与其持土量(相关系数 0.664 8)显著相关,与土壤深度(相关系数 0.364 3)成正相关关系^[28]。

表 5 花江不同土壤深度花椒林碳汇量状况

地点	评价指标						
	石漠化等级	生长期/a	株高/m	基径/cm	土深/m	持土量	碳汇量/(t·hm ⁻²)
水井湾	轻度	6	2.7	7.57	1.17	0.934 78	3.24
赵家水井	中度	6	2.37	5.84	0.76	0.743 79	3.12
大石板	强度	6	2.0	5.39	0.56	0.602 79	2.81

3.3 不同石漠化等级花椒林碳汇量变化分析

喀斯特石漠化作为一种土地严重或极度退化景观类型,是在喀斯特脆弱生态环境下,人类不合理的干扰活动,造成植被破坏、水土流失、岩石逐渐裸露、土地总体生产力衰退或丧失、土地利用率低、地表在视觉景观上呈现类似荒漠景观的演变过程。由于干扰程度、生境、土地利用、植被、土壤、石漠化发育程度等方面的差异,形成了不同强度等级的石漠化土地。在不同等级石漠化土地中,植物生长的立地条件如水分、土壤深度、持土量、土壤有机质等立地条件不同,从而导致在不同等级石漠化土地中植物的生物量(碳汇量)也存在较大差异。

由表 6 可以得出,花椒林的平均碳密度为 3.06 t/hm²,这与王娟等^[29]估算的灌木林碳密度 3.31 t/hm² 的结果较为相近,与詹鹏等^[31]对贵州省罗甸县麻疯树能源林的碳汇功能研究中得出的罗甸县麻疯树能源林的总固碳量为 15.24 t/hm² 相比较低,但这很大程度受林种类型与林分结构的影响,可比性并不强。由强度石漠化到中度石漠化再到轻度石漠化,碳汇量强度(3.24 t/hm²)<中度(3.12 t/hm²)<轻度(2.81 t/hm²),随着石漠化强度的减小,碳汇量在增加。这是因为在强度石漠化地区,土层薄,持土量低,有机质含量低等因素限制了花椒的生长;而在轻度石漠化地区,植物生长的立地条件如持土量和土壤深度等相对强度石漠化地区较好,能为植物的生长提供更多的能量和养分。因此,在喀斯特石漠化地区,花椒林的碳汇量的变化有随着石漠化强度增加而降低的趋势,石漠化强度越高碳汇量越低,这

从表 5 可以看出,花椒林的碳汇量与土壤深度和持土量之间是正相关关系,其中土壤深度水井湾(1.17 m)>赵家水井(0.76)>大石板(0.56),持土量水井湾(0.934 781)>赵家水井(0.743 795)>大石板(0.602 799),土壤越深,持土量越大,花椒林的碳汇量就越大,反之亦然。这是因为花椒林的碳汇量主要是由其生物量决定的,而生物量则与花椒的生长密切相关,林下土壤厚度与持土量大小直接反应出花椒生长所需的物质和能量来源的多少,间接但较大地影响了花椒的生物量大小,从而影响其碳汇量的大小。

与石漠化对植物的生长的影响有着密切的联系,石漠化强度越大,植被生长的立地条件就越差,生物量越小,碳汇量必然也就越小。

表 6 不同石漠化等级花椒林碳汇总量

石漠化等级	评价指标			
	平均碳密度/(t·hm ⁻²)	石漠化面积/hm ²	总碳储量/t	碳汇最优效益/元
强度石漠化	2.81	567.8	1 595.6	1.05×10 ⁶ ~1.57×10 ⁶
中度石漠化	3.12	1 801.6	5 620.8	3.69×10 ⁶ ~5.54×10 ⁶
轻度石漠化	3.24	1 114.9	3 612.6	2.37×10 ⁶ ~3.56×10 ⁶

3.4 花椒林碳汇效益与最优经济效益分析

石漠化治理具有巨大的正外部效益,诸多学者正在研究国内生态补偿机制问题,将国家、集体、个人纳入其中,实行国家、区域、产业等多种补偿形式,以期通过生态补偿机制确保退耕还林(草)“退得下、保得住、不复耕”。而目前通过计算森林生态系统的固碳减排效应,开展林业碳汇项目,将生态效益兑现为经济价值,为石漠化治理争取后补偿资金具有巨大潜力。参照中国森林碳汇的最优价格(即 10.11~15.17 美元/t)^[30],可计算得出研究区花椒林的碳汇最优效益。由表 6 可以看出,研究区内强度、中度和轻度石漠化地花椒林带来的转换为经济价值的生态效益分别为 1.05×10⁶~1.57×10⁶,2.37×10⁶~3.56×10⁶,3.69×10⁶~5.54×10⁶ 元。这与詹鹏等^[31]罗甸县麻疯树能源林的最优经济效益值为 1.0×10⁴~1.5×10⁴ 元/hm² 相比较低,但是詹鹏等在计算罗甸县麻疯树能源林的最优经济效益时不仅仅考虑了麻

疯树的碳汇效益,也考虑了其作为能源树的经济效益。同样地,花椒作为花江地区的一种经济作物,其果实直接经济价值约为 1.6×10^6 元/hm²[32],再加上其碳汇效益,花椒林的最优经济效益值为 $1.92 \sim 2.56 \times 10^4$ 元/hm²,远远高于麻疯树。

4 结论

花椒属于喀斯特高原峡谷石漠化治理的优势树种,其在提高石漠化地区人民收入水平、缓和人地矛盾的同时,也改善了当地的生态环境,提高了陆地生态系统碳汇能力。花江示范区强度、中度和轻度石漠化地区花椒林平均碳密度为 3.06 t/hm²,相比胡会峰等得出的灌木林碳密度 11.74 ± 2.46 t/hm²[33],Woodwell 等[34]估算了全球 2.65×10^9 hm² 灌木林和沙漠灌丛的植被碳储量为 27.9 Pg,平均碳密度为 10.5 t/hm² 也较低,这主要是因为:①花江属于石漠化地区,植被覆盖率低、基岩裸露率高、水土流失和植被破坏严重,碳密度低;②花椒是花江地区石漠化治理的优势树种,在石漠化地区作为经济林按标准化种植导致其植株密度低、林下草本生物以及其他伴生植物被砍伐,从而导致花椒林碳密度相对其他灌木林较低。

贵州省花江石漠化治理示范区花椒林碳储量为 10 828.95 t(不包括土壤碳储量),平均碳密度为 3.06 t/hm²,在花江示范区不同石漠化等级花椒林中,轻度石漠化地区的碳汇量最大,平均碳密度为 3.24 t/hm²,强度石漠化最小,为 2.81 t/hm²,主要原因是不同等级石漠化土地中花椒生长的立地条件不同,土壤有机质含量、持土量,土壤深度等因素是造成花江示范区花椒林林碳密度较低的主要原因之一。因此,做好石漠化治理,防止水土流失及提高土壤有机质含量和土地持土量是花江地区未来花椒林业发展的重点。

森林生物量及其组成树种的含碳率是研究森林碳汇量的两个关键因子,对它们的准确测定及估计是估算森林碳汇量的基础[35]。在本文的估算研究中,采用木本植物平均含碳率 0.5;灌木采用平均含碳率 0.45。没有根据不同森林类型、不同龄级和林木的不同器官采用不同的含碳率来计算含碳率,也没有完成该区花椒林的生物量方程,因此,有必要在今后通过建立本地区花椒林生物量方程及增加研究样点,进一步阐明花江地区不同石漠化等级花椒林碳汇效益及综合经济效益在石漠化治理过程中的变化规律。

[参 考 文 献]

[1] 高贵龙,邓自民,熊康宁,等.喀斯特的呼唤与希望:贵州喀斯特生态环境建设与可持续发展[M].贵阳:贵州科

技出版社,2003:1-8.

- [2] 刘云,熊康宁.贵州喀斯特山地生态退化与生态经济重建研究[J].山西煤炭资源管理干部学院学报,2009,6(1):120-124.
- [3] 但文红.喀斯特峡谷农业可持续发展模式研究:以贵州花江峡谷为例[J].中国岩溶,1999,18(3):205-209.
- [4] 熊康宁,黎平,周忠发,等.喀斯特石漠化的遥感—GIS典型研究:以贵州省为例[M].北京:地质出版社,2002:17-28.
- [5] 袁道先.现代岩溶学在中国的发展[J].地质评论,2006,11(6):733-737.
- [6] 吴克华,熊康宁,容丽,等.不同等级石漠化综合治理的植被恢复过程特征:以贵州省花江峡谷为例[J].地球与环境,2007,35(4):327-335.
- [7] 贺瑞坤,彭慧蓉,陈训.海拔高度对贵州花江峡谷顶坛花椒产量与品质的影响[J].安徽农业科学,2008,36(6):2294-2295.
- [8] 何跃军,刘济明.花江低热河谷区不同退耕还林模式植被恢复效益研究[J].安徽农业科学,2008,36(4):1439-1440,1459.
- [9] 顾凯平,张坤,张丽霞.森林碳汇计量方法的研究[J].南京林业大学学报:自然科学版,2008,9(5):105-109.
- [10] 兰安军,张百平,熊康宁,等.黔西南脆弱喀斯特生态环境空间格局分析[J].地理研究,2003,22(6):733-741.
- [11] 吕涛.3S技术在贵州喀斯特山区土地石漠化现状调查中的应用[J].中国水土保持,2002,22(6):26-27.
- [12] 王宇,张贵.滇东岩溶石山地区石漠化特征及成因[J].地球科学进展,2003,18(6):933-938.
- [13] 王瑞江,姚长洪,蒋忠诚,等.贵州六盘水石漠化的特点、成因与防治[J].中国岩溶,2001,20(3):211-216.
- [14] 童立强.西南岩溶石山地区石漠化信息自动提取技术研究[J].国土资源遥感,2003,31(4):36-38.
- [15] 李阳兵,王世杰,谭秋,等.喀斯特石漠化的研究现状与存在的问题[J].地球与环境,2006,34(3):9-14.
- [16] Foley J A. An Equilibrium model of the terrestrial carbon budget[J]. Tellus, 1995,47(8):310-319.
- [17] Chang Huipeng, Michael J. Contribution of China to the global cycle since the last glacial maximum reconstruction from palaeovegetation maps and an empirical biosphere model[J]. Tellus, 1997,49(B):393-40.
- [18] 方楷,杨清培,赵广东,等.江西主要竹类植物碳密度的时空差异分析方[J].江西科学,2010,28(4):449-452.
- [19] 方精云,陈安平,赵淑清,等.中国森林生物量的估算:对 Fang 等 Science 一文(Science,2001,291:2320-2322)的若干说明[J].植物生态学报,2002,26(2):243-249.
- [20] 王效科.中国森林生态系统的生物量、碳贮量和生物物质自然释放的含碳气体[D].北京:中国科学院生态环境研究中心,1997.

- [21] 刘志刚,马钦彦. 华北落叶松人工林生物量及生产力的研究[J]. 北京林业大学学报, 1992, 5(4): 76-79.
- [22] 刘兴良,郝晓东,杨冬生,等. 卧龙巴郎山川滇高山栎灌丛地上生物量及其模型[J]. 生态学杂志, 2006, 25(5): 487-491.
- [23] 冯耀宗. 物种多样性与人工生态系统稳定性探讨[J]. 应用生态学报, 2003, 14(6): 853-857.
- [24] 黄建辉. 物种多样性与生态系统功能: 影响机制及有关假说[J]. 生物多样性, 2001, 9(1): 1-7.
- [25] 龙成昌,陈训. 花江峡谷地区顶坛花椒生长状况与土壤条件相关分析[J]. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2003, 21(3): 102-104.
- [26] 纪永福,李强民,张锦春,等. 民勤不同立地条件下人工梭梭林生长状况研究[J]. 甘肃林业科技, 2010, 35(3): 1-6.
- [27] 方乐金,曹健康. 立地条件对 9 a 生毛竹实生林主要生长指标的影响[J]. 世界竹藤通讯, 2009, 7(3): 22-25.
- [28] 龙成昌,陈训. 花江峡谷地区顶坛花椒生长状况与土壤条件相关分析[J]. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2003, 21(3): 102-104.
- [29] 王娟,陈云明,曹扬,等. 子午岭辽东栎林不同组分碳含量与碳储量[J]. 生态学杂志, 2012, 31(12): 3058-3063.
- [30] 张颖,吴丽莉,苏帆,等. 我国森林碳汇核算的计量模型研究[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(2): 194-200.
- [31] 詹鹏,欧国腾,陈介南. 罗甸县麻疯树能源林的碳汇功能[J]. 经济林研究, 2013, 31(3): 147-149.
- [32] 张晓珊,任朝辉. 贵州喀斯特峡谷退耕还林示范区生态经济效益监测与评价初探[J]. 贵州林业科技, 2006(4): 42-46.
- [33] 胡会峰,王志恒,刘国华,等. 中国主要灌丛植被碳储量[J]. 植物生态学报, 2006, 30(4): 539-544.
- [34] Woodwell G M, Whittaker R H, Reiners W A, et al. Delwiche CC, Botkin DB (1978). The biota and the world carbon budget[J]. Science, 1998 (199): 1441-1446.
- [35] 陈遐林,马钦彦,康峰峰,等. 山西太岳山典型灌木林生物量及生产力研究[J]. 林业科学研究, 2002, 15(3): 304-309.

(上接第 291 页)

[参 考 文 献]

- [1] 吴次芳,潘文灿. 国土规划的理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] 晏晓红. 土地利用总体规划实施评价[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- [3] 刘转花,林爱文,陈娜. 基于生态系统服务价值的天门土地利用总体规划环境影响评价研究[J]. 国土与自然资源研究, 2014(2): 13-16.
- [4] 赵同谦,欧阳志云,贾良清,等. 中国草地生态系统服务功能间接值评价[J]. 生态学报, 2004, 24(6): 1101-1110.
- [5] 戴星翼,俞厚未,董梅. 生态服务的价值实现[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [6] 吴克宁,赵珂,赵举水,等. 基于生态系统服务功能价值理论的土地利用规划环境影响评价: 以安阳市为例[J]. 中国土地科学, 2008(02): 23-28.
- [7] 唐弢,朱坦,徐鹤,等. 基于生态系统服务功能价值评估的土地利用总体规划环境影响评价研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2007, 17(3): 45-49.
- [8] 周嘉,高丹,常琳娜. 生态系统服务功能评估在土地利用总体规划环境影响评价中的应用: 以黑龙江省大庆市为例[J]. 经济地理, 2011, 31(6): 1014-1018.
- [9] 陈颖,石培基,赵峥,等. 基于生态服务价值核算的土地利用总体规划生态效益评价: 以甘肃省民乐县为例[J]. 土壤通报, 2013, 44(3): 532-536.
- [10] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997(387): 253-260.
- [11] 谢高地,肖玉,甄霖,等. 我国粮食生产的生态服务价值研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(3): 10-13.
- [12] 肖玉,谢高地,安凯. 莽措湖流域生态系统服务功能经济价值变化研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(5): 676-680.
- [13] 郭荣中,杨敏华. 长株潭地区生态系统服务价值分析及趋势预测[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 238-246.
- [14] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1987.
- [15] 严明,廖铁军. 基于 Excel 的灰色预测模型在土地利用规划中的应用[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(12): 3627-3628.
- [16] 傅立. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学技术出版社, 1992.