

# 岩溶区不同恢复阶段櫟木根际土壤生态化学计量学特征

梁月明<sup>1</sup>, 李强<sup>1</sup>, 潘复静<sup>2</sup>

(1. 中国地质科学院 岩溶地质研究所, 国土资源部、广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541000; 2. 桂林理工大学 环境科学与工程学院, 广西 桂林 541000)

**摘要:** [目的] 探讨不同植被恢复阶段中櫟木(*Loropetalum chinense*)根际土壤生态化学计量学特征, 揭示岩溶石漠化区不同恢复阶段下櫟木养分利用规律及限制因子, 为岩溶区植被恢复与重建提供科学依据。[方法] 利用生态化学计量学方法, 分析桂西北岩溶区不同植被恢复阶段(灌木林、原生林)櫟木根际土壤生态化学计量学特征。[结果] 櫟木根际土壤 C、N、P 含量表现为灌木林阶段高于原生林阶段, 而 C : N, C : P, N : P 比值则刚好相反; 同一植被恢复阶段, 不同坡位间櫟木根际土壤 C : P 与 N : P 比值存在显著差异; 相关性分析表明, 土壤 C 含量与土壤 N : P 含量存在显著正相关关系, 土壤 N、P 均与 C : N, C : P, N : P 存在显著正相关关系, 土壤 C : P 与 C : N, N : P 存在显著正相关关系。[结论] 櫟木根际养分供应状况与其生境密切相关, 在植被恢复前期(灌木林)櫟木生长容易受 N 素限制, 到植被恢复后期櫟木生长易受 P 素限制。

**关键词:** 生态化学计量; 岩溶; 櫟木; 植被恢复; 养分限制

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)05-0123-05

中图分类号: S153.6

**文献参数:** 梁月明, 李强, 潘复静. 岩溶区不同恢复阶段櫟木根际土壤生态化学计量学特征[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 123-127. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 05. 021; Liang Yueming, Li Qiang, Pan Fujing. Ecological stoichiometric characteristics of *Loropetalum chinense* rhizosphere soils at different vegetation restoration stage in karst region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(5): 123-127. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 05. 021

## Ecological Stoichiometric Characteristics of *Loropetalum Chinense* Rhizosphere Soils at Different Vegetation Restoration Stage in Karst Region

LIANG Yueming<sup>1</sup>, LI Qiang<sup>1</sup>, PAN Fujing<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Land and Resources & Guangxi Zhuangzu Autonomy Region, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, Guangxi 541000, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi Zhuang Autonomous Region 541000, China)

**Abstract:** [Objective] To explore the ecological stoichiometric characteristics of *Loropetalum chinense* rhizosphere soils and to find out its nutrient use regularity and limiting factors at different vegetation restoration stages of karst region. These works were expected to provide scientific basis for decision making of vegetation restoration and reconstruction in the karst region of Northwest Guangxi Zhuang Autonomous Region. [Methods] Based on the ecological stoichiometry theory, we tested the C : N : P ratios of *L. chinense* rhizosphere soils sampled at two typical vegetation restoration stages (shrubland and primary forest). [Results] Soil total carbon, nitrogen and phosphorus concentrations of *L. chinense* rhizosphere soils in shrubland were higher than those of primary forest; while the patterns of C : N, C : P and N : P ratios were on the contrary. The C : P and N : P ratios of *L. chinense* rhizosphere soils were significantly different among the lower, middle, and upper slopes at the same vegetation restoration stage. In addition, the rhizosphere soil organic carbon was positively correlated with soil N : P ratio ( $p < 0.05$ ); Both of the soil total nitrogen and phosphorus

收稿日期: 2017-07-10

修回日期: 2017-07-17

资助项目: 广西自然科学基金项目“广西喀斯特地区不同石灰土中细菌群落特征解析”(2016GXNSFBA380179); 岩溶地质研究所基本科研业务费项目(2016004); 中国地质大调查项目(DD20160305)

第一作者: 梁月明(1983—), 女(汉族), 广东省湛江市人, 博士, 助理研究员, 主要从事岩溶生态和微生物分子生态学, E-mail: yueming0919@163.com。

通讯作者: 潘复静(1984—), 男(壮族), 广西壮族自治区钦州市人, 博士, 讲师, 主要从事岩溶植被土壤养分互惠机制研究, E-mail: panfujing28@163.com。

were positively correlated with soil C : N, C : P, N : P ratios ( $p < 0.05$ ); and the soil C : P ratio was positively correlated with C : N and N : P ratios ( $p < 0.05$ ). [Conclusion] The nutrient providing status of *L. chinense* rhizosphere soil was mainly limited by soil N in the earlier vegetation restoration stage (shrubland), while was mainly limited by soil P in latter vegetation restoration stage (primary forest).

**Keywords:** ecological stoichiometry; karst region; *Loropetalum chinense*; vegetation restoration; nutrient limitation

生态化学计量学是研究生态过程中多重化学元素的平衡与比率关系的科学,目前的研究主要集中在 C, N, P 元素的计量关系。C, N, P 是生命体最重要的生源元素,其中, C 是构成生物体内干物质的主要元素, N 和 P 是各种蛋白质和遗传物质的重要组成部分,也是植物生长的限制性元素<sup>[1]</sup>。因此,利用生态过程中 C, N, P 等元素计量关系,可以探明植物养分利用策略及判断限制性元素<sup>[2]</sup>,对植被恢复过程调控具有重要的实践意义。

檵木(*Loropetalum chinense*)是中国岩溶区灌丛生态系统中最具优势的一种灌丛植物。它具有分布广,早生、适钙等特点,是岩溶区植被恢复的先锋树种。已有研究表明,檵木群落随着植被自然恢复演替的进行,已经形成了檵木群落的灌木阶段及乔林阶段<sup>[3-4]</sup>。因此,研究岩溶石漠化区檵木在不同植被恢复阶段其根际土壤生态化学计量学特征能充分了解植被恢复定植成效的内在机理。目前,不少学者关注了岩溶区的生态化学计量学特征的研究,如谭秋锦等<sup>[5]</sup>从生态系统水平研究土壤生态化学计量学特征发现,岩溶区 C : N 与 C : P 比值均比其他地区非岩溶生态系统低;潘复静等<sup>[6]</sup>从植物群落水平研究不同植被群落凋落物生态化学计量学特征发现,岩溶区 N : P 比值是制约养分循环的重要因素;杨慧等<sup>[7]</sup>、杜有新等<sup>[8]</sup>与罗绪强等<sup>[9]</sup>从植物个体水平研究植物生态化学计量学特征发现,岩溶区绝大多数植物属于 P 限制性植物。但是,关于岩溶区相同植物种群在不同植被恢复阶段中,其根际土壤生态化学计量学特征的研究尚未见报道。

本文拟在广西壮族自治区(以下简称广西)环江县同进村选择代表性檵木灌木林样地,在木论自然保护区内选择代表性檵木原生林样地,采集檵木根际土壤样品,研究同种植物檵木的根际土壤在不同植被恢复阶段的生态化学计量学特征,并分析它们之间的关系,揭示岩溶石漠化区不同恢复阶段下檵木养分利用规律及限制因子,以期为岩溶区退化生态系统恢复与重建提供科学依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究地区概况

研究样区同进村(24°50'N, 105°55'E),位于广西

壮族自治区环江毛南族自治县西北部,属于亚热带季风气候区,年均气温 10.1~28℃;年均日照时数 145.1 h;年均降雨量 1 389.1~1 750 mm,空气平均相对湿度为 79%,成土母质为白云岩发育的石灰土,檵木灌木林群落有 15~20 a 的退耕历史,檵木生境具体见表 1。

木论自然保护区(25°06'N, 107°53'E)属于亚热带季风气候区,年平均气温 15.0~18.7℃,极端高温 36℃,极端低温 -5℃;年均降雨量 1 530~1 820 mm,林内相对湿度一般在 80%~90%。保护区森林面积 9 992 hm<sup>2</sup>,森林覆盖率 93.4%,檵木原生林群落约 80 a 多未受人类干扰,檵木生境见表 1。

表 1 檵木在不同植被恢复阶段中的生境描述

物种	恢复阶段	栖息地
檵木	灌木林	轻度干扰,冠层高度 10~12 m,覆盖度 50%~60%
檵木	原生林	没有干扰,冠层高度 20~25 m,覆盖度 80%~90%

檵木为金缕梅科檵木属植物,多为灌木,是岩溶灌丛生态系统中常见的建群种。喜生于向阳的丘陵及山地,亦常出现在马尾松林及杉林下。主要分布在中国中部、南部及西南各省。由于它具有分布广,早生、适钙等特点,从而成为岩溶区植被恢复优先考虑的树种。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样方布设、样品采集与分析 本研究采用野外样地调查取样和“空间代替时间”相结合的研究方法于 2016 年 7 月在环江县同进村根据植被类型选取代表性檵木灌木林样地,并在木论自然保护区内选取人为干扰较少的檵木原生林样地。每种植被类型从山顶到山脚布设 1 条样带,每条样带分别在上、中、下坡位布设 3 个样方(20 m×30 m),每个样方相距 50 m。记录每个样方经纬度、高程、地形等信息的调查。

根际土壤样品采集采用抖落法<sup>[10]</sup>。在上述所选的典型样地内挖取具有完整根系的土体(根系主要分布的范围),先轻轻抖动植物,抖落不含根系的大块土壤,然后采集黏附在根围的土壤(距离根围 0~5 mm)作为根际土,并尽可能去除混杂于根际土中的

根系。为了获得具有代表性样品,每个样方采集 6 个櫟木根际土壤样品,一共 36 个根际土壤样品〔36 为 3 个坡位 $\times$ 2 种植被类型(灌木林与原生林) $\times$ 6 个重复〕。将采集到的根际土壤样品用塑料袋装好,运回实验室风干,用于土壤基本理化性质的测定。

土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾-硫酸氧化法测定;全氮(TN)采用半微量凯氏法测定;全磷(TP)采用 NaOH 熔融、钼锑抗比色法测定。

1.2.2 统计与分析 采用 Office 2010 Excel 进行数据的计算与初步分析,对土壤 C,N,P 含量及 C:N:P 比值进行正态性检验,均服从正态分布( $p>0.05$ )。用 SPSS 19.0 对数据进行方差分析 LSD 检验(Least-significant difference)、相关性等统计分析。

表 2 不同植被恢复阶段櫟木根际土壤 C,N,P 含量及 C:N:P 比值

植被类型	C 含量/(g·kg <sup>-1</sup> )	N 含量/(g·kg <sup>-1</sup> )	P 含量/(g·kg <sup>-1</sup> )	C:N	C:P	N:P
灌木林	56.91±1.41 <sup>a</sup>	6.04±0.14 <sup>a</sup>	0.94±0.06 <sup>a</sup>	9 <sup>b</sup>	64 <sup>b</sup>	6 <sup>b</sup>
原生林	49.17±2.18 <sup>b</sup>	4.64±0.23 <sup>b</sup>	0.42±0.02 <sup>b</sup>	11 <sup>a</sup>	120 <sup>a</sup>	11 <sup>a</sup>
平均值	53.03	5.34	0.68	10	91	9

注:同一列不同小写字母表示差异显著( $p<0.05$ );(LSD $\leq$ 0.05;M+SE,  $n=6$ )。下同。

## 2.2 櫟木在不同坡位中其根际土壤 C,N,P 含量及 C:N:P 比值特征

同一植被恢复阶段,櫟木根际土壤 N,P 含量在不同坡位间存在显著差异(表 3)。

其中,櫟木根际土壤 N,P 含量在灌木林阶段呈现下坡位高于上坡位的趋势,而在原生林阶段则刚

好相反。灌木林与原生林阶段櫟木根际土壤 C:N 在不同坡位间差异不显著( $p>0.05$ ;表 3)。C:P 与 N:P 比值在同一植被类型群落不同坡位间差异显著( $p<0.05$ ),其中,C:P 比值呈现上坡位 $\approx$ 中坡位 $>$ 下坡位,N:P 比值呈现上坡位 $\approx$ 下坡位 $>$ 中坡位。

## 2 结果与分析

### 2.1 櫟木在不同植被恢复阶段中其根际土壤 C,N,P 含量及 C:N:P 比值特征

櫟木根际土壤 C,N,P 含量分别为 49.17~56.91,4.64~6.04,0.42~0.94 g/kg,均表现为灌木林高于原生林(表 2)。从植被恢复前期(灌木林)到后期(原生林),櫟木根际 C:N 分别为 9,11,平均值为 10;C:P 分别为 64,120,平均值为 91;N:P 分别为 7,11,平均值为 9;櫟木根际元素比值在灌木林阶段与原生林阶段均存在显著差异( $p<0.05$ )。

表 3 不同坡位櫟木根际土壤 C,N,P 含量及 C:N:P 比值

植被类型	坡位	C 含量/(g·kg <sup>-1</sup> )	N 含量/(g·kg <sup>-1</sup> )	P 含量/(g·kg <sup>-1</sup> )	C:N	C:P	N:P
灌木林	上坡	55.77±1.05 <sup>a</sup>	5.74±0.09 <sup>b</sup>	0.81±0.04 <sup>b</sup>	10 <sup>a</sup>	70 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>
	中坡	58.30±1.28 <sup>a</sup>	5.87±0.28 <sup>ab</sup>	0.83±0.07 <sup>b</sup>	10 <sup>a</sup>	73 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>
	下坡	56.67±4.11 <sup>a</sup>	6.52±0.23 <sup>a</sup>	1.19±0.12 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>	48 <sup>b</sup>	6 <sup>b</sup>
原生林	上坡	55.27±3.12 <sup>a</sup>	5.17±0.28 <sup>a</sup>	0.52±0.03 <sup>a</sup>	11 <sup>a</sup>	108 <sup>b</sup>	10 <sup>b</sup>
	中坡	51.03±2.56 <sup>a</sup>	4.92±0.38 <sup>a</sup>	0.36±0.01 <sup>b</sup>	11 <sup>a</sup>	141 <sup>a</sup>	14 <sup>a</sup>
	下坡	41.2±2.35 <sup>b</sup>	3.84±0.33 <sup>b</sup>	0.37±0.02 <sup>b</sup>	11 <sup>a</sup>	112 <sup>b</sup>	10 <sup>b</sup>

### 2.3 土壤 C,N,P 含量与 C:N:P 比值之间的关系

表 4 为土壤 C,N,P 含量与 C:N:P 比值的 Pearson 相关性分析结果。由表 4 可知,土壤 C 含量与土壤 N,P 含量存在显著正相关,土壤 N 与土壤 P 含量存在显著正相关;土壤 C 含量与土壤 N:P 含量存在显著正相关关系,土壤 N,P 均与 C:N,C:P,N:P 存在显著正相关关系,土壤 C:P 与 C:N,N:P 存在显著正相关关系。

表 4 土壤 C,N,P 含量与 C:N:P 比值的 Pearson 相关性分析

项目	N 含量	P 含量	C:N	C:P	N:P
C 含量	0.799**	0.6**	—	—	—
N 含量	—	0.73**	-0.674**	-0.541**	-0.398**
P 含量		—	-0.457**	-0.863**	-0.841**
C:N			—	0.563**	—
C:P				—	0.958**
N:P					—

注:\*\*代表  $p<0.01$ ;"—"代表相关性不显著。

### 3 讨论

#### 3.1 不同植被恢复阶段檫木根际土壤养分含量的变化特征

土壤养分是植物的主要营养源,其供应状况与植物生长发育密切相关。本研究显示,随着植被恢复,原生林阶段檫木根际土壤养分含量显著低于灌木林阶段,这与杨扬等<sup>[11]</sup>研究结果一致。在植物生长期,由根系释放到根际的光合产物约占植株全部的净光合产物的 15%~40%<sup>[12]</sup>。在不同发育阶段,植物的光合作用强度不同,将直接影响到根系释放到根际的土壤养分含量<sup>[13]</sup>。檫木在灌木阶段,光照条件好,有利于提高光合速率及新陈代谢,刺激根系分泌大量养分来维持自身生长,因而其根际土壤养分含量相对较高;而檫木在原生林阶段,光照条件较差,光合速率及新陈代谢慢,根系分泌不活跃,从而导致其根际土壤养分含量相对较低。

#### 3.2 不同坡位檫木根际土壤养分含量的变化特征

地形因子与土壤之间并没有直接的物质与能量的交换,主要通过径流、侵蚀和生物循环引起物质与能量的空间再分配,从而影响土壤养分的积累和循环过程<sup>[14]</sup>。已有的研究表明,不同的地貌部位显著影响坡面土壤碳氮含量的分布<sup>[15-17]</sup>,在中国大部分地区土壤养分存在明显的“洼积效应”,即随着坡位的升高,土壤养分含量会逐渐减少。在本研究中,檫木根际土壤养分在原生林阶段呈现养分“洼积效应”,但在灌木林阶段却出现“养分倒置”的现象,即上坡位的土壤养分含量高于下坡位。本研究结果与刘淑娟等<sup>[18]</sup>在岩溶区开展不同植被演替阶段表层土壤养分时空分布特征研究结果一致,即植物根际土壤养分也存在“倒置现象”。然而,土壤养分的“倒置现象”在岩溶区并不普遍存在,与人为干扰密切相关<sup>[19]</sup>。因此,在受干扰较严重的灌木林阶段,檫木根际土壤养分出现“倒置现象”,而在未受干扰的原生林阶段,檫木根际土壤养分呈现较明显的“洼积效应”。

#### 3.3 元素之间的计量关系

土壤 C、N、P 比是土壤质量的重要评价指标<sup>[20]</sup>。其中,土壤 C:N 与有机质矿化速度成反比<sup>[21]</sup>,在土壤碳氮循环中起重要作用。本研究区土壤 C:N 平均值为 10,略低于中国土壤 C:N 平均值(10.1~12.1)<sup>[22]</sup>,且灌木阶段檫木根际土壤 C:N 平均值显著低于原生林阶段,说明灌木阶段檫木根际土壤有机碳分解速度较快,有利于满足植被恢复早期檫木的快速生长。但在维持土壤肥力方面,檫木在灌木林阶段可能比不上原生林阶段。

土壤 C:P 可以作为指示磷有效性的重要指标,C:P 比值较低意味着磷有效性高。本研究区,土壤 C:P 远远高于其它非岩溶区<sup>[23-24]</sup>,说明该地区 P 的有效性偏低,与章程<sup>[25]</sup>、杨慧等<sup>[26]</sup>在岩溶区的研究结果一致,与岩溶土壤中较高 pH 值有关。高 pH 值增强土壤的固磷作用,形成难溶的磷灰石导致磷的有效性降低<sup>[27]</sup>。此外,檫木根际土壤 C:P 在原生林阶段高于灌木阶段,说明相对于灌木阶段,原生林阶段土壤 P 有效性更低,檫木在原生林阶段生长更容易受土壤 P 素的限制,与同在岩溶区的 Pan 等<sup>[28]</sup>人研究结果一致。

土壤 N:P 作为养分限制的有效指标,可以判断不同植被恢复阶段下檫木是否存在不同养分限制。Tessier 等<sup>[29]</sup>研究表明,当植物 N:P 为 14 时,植物生长受 N 素限制,当植物 N:P 为 16 时,植物生长受 P 素限制。然而,杨慧等<sup>[7]</sup>人在岩溶区测定 12 种典型森林植物叶片 C、N、P 素含量,发现 Tessier 标准判断植物叶片受 N 或 P 的限制在岩溶区不完全适用。因为影响植物养分限制性的因素往往是复杂和综合,难以用固定数据来界定不同区域不同生态系统 N、P 元素限制作用的阈值<sup>[30]</sup>。因此,用植物 N:P 比表征 N、P 养分的限制作用,更主要是反映 N、P 元素限制作用的相对大小及相互转化趋势,价值可能更主要在于指示作用。本研究发现,檫木根际土壤 N:P 比值在原生林阶段(11)高于灌木林阶段(9),说明岩溶区植被恢复后期植物更容易受 P 素限制,与 Pan 等<sup>[27]</sup>人研究结果一致。

### 4 结论

(1) 不同植被恢复阶段,檫木根际土壤 C:P 与 N:P 比值存在显著差异,且这两个比值在原生林阶段均高于灌木林阶段,说明檫木在植被恢复前期(灌木林)生长容易受 N 素限制,到植被恢复后期受 P 素限制。

(2) 在岩溶区,不同坡位间檫木根际土壤 C:P 与 N:P 比值存在显著差异,与岩溶区生境异质性高密切相关。异质生境影响土壤养分的分布与迁移,即使在微小空间尺度下,岩溶区土壤生态化学计量学特征也存在较大的波动。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 杨惠敏,王冬梅. 草—环境系统植物碳氮磷生态化学计量学及其对环境因子的响应研究进展[J]. 草业学报, 2011, 20(2): 244-252.
- [2] 赵晓,曾全超,安韶山,等. 黄土高原不同封育年限草地土壤与植物根系的生态化学计量特征[J]. 土壤学报,

- 2016,53(6):1541-1551.
- [3] 马姜明,吴蒙,占婷婷,等. 漓江流域岩溶区櫟木群落不同恢复阶段物种组成及多样性变化[J]. 生态环境学报, 2013,22(1):66-71.
- [4] 马姜明,占婷婷,莫祖英,等. 漓江流域岩溶区櫟木群落不同恢复阶段主要共有种生态位变化[J]. 西北植物学报, 2012,32(12):2530-2536.
- [5] 谭秋锦,宋同清,曾馥平,等. 峡谷型喀斯特不同生态系统土壤养分及其生态化学计量特征[J]. 农业现代化研究, 2014,35(2):225-228.
- [6] 潘复静,张伟,王克林,等. 典型喀斯特峰丛洼地植被群落凋落物 C:N:P 生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2011,31(2):335-342.
- [7] 杨慧,李青芳,涂春艳,等. 桂林毛村岩溶区典型植物叶片碳、氮、磷化学计量特征[J]. 广西植物, 2015,35(4):493-499.
- [8] 杜有新,李恋卿,潘根兴,等. 贵州中部喀斯特山地三种优势灌木养分分布[J]. 生态环境学报, 2010,19(3):626-630.
- [9] 罗绪强,张桂玲,杜雪莲,等. 茂兰喀斯特森林常见钙生植物叶片元素含量及其化学计量学特征[J]. 生态环境学报, 2014,23(7):1121-1129.
- [10] Macrae A, Lucon C M M, Rimmer D L, et al. Sampling DNA from the rhizosphere of *Brassica napus* to investigate rhizobacterial community structure [J]. *Plant and Soil*, 2001,233(2):223-230.
- [11] 杨扬,刘炳君,房江育,等. 不同植茶年龄茶树根际与非根际土壤微生物及酶活性特征研究[J]. 中国农学通报, 2011,27(27):118-121.
- [12] 朱祖祥. 土壤学[M]. 北京,农业出版社,1983. 55-57.
- [13] 张学利,杨树军,张百习,等. 不同林龄樟子松根际与非根际土壤的对比[J]. 福建林学院学报, 2005,25(1):1-4.
- [14] 李天杰,宁大同,薛纪渝,等. 环境地学原理[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
- [15] 张伟,陈洪松,王克林,等. 典型喀斯特峰丛洼地坡面土壤养分空间变异性研究[J]. 农业工程学报, 2008,24(1):68-73.
- [16] 高凯,张丽娟,于永奇,等. 沙地土壤 pH 值、碳、氮、磷含量对微地形变化的响应[J]. 水土保持通报, 2016,36(1):88-92.
- [17] 张宏芝,朱清科,王晶,等. 陕北黄土坡面微地形土壤物理性质研究[J]. 水土保持通报, 2011,31(6):55-59.
- [18] 刘淑娟,张伟,王克林,等. 桂西北喀斯特峰丛洼地表层土壤养分时空分异特征[J]. 生态学报, 2011,31(11):3036-3043.
- [19] 欧阳资文,彭晚霞,宋同清,等. 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[J]. 应用生态学报, 2009,20(6):1329-1336.
- [20] 王绍强,于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008,28(8):3937-3947.
- [21] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(2):151-163.
- [22] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社,2000:1-311.
- [23] 杨阳,刘秉儒,杨新国,等. 荒漠草原中不同密度人工柠条灌丛土壤化学计量特征[J]. 水土保持通报, 2014,34(5):67-73.
- [24] 朱秋莲,邢肖毅,张宏,等. 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2013,33(15):4674-4682.
- [25] 章程. 典型岩溶泉流域不同土地利用方式土壤营养元素形态及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2009,23(4):165-169.
- [26] 杨慧,曹建华,孙蕾,等. 岩溶区不同土地利用类型土壤无机磷形态分布特征[J]. 水土保持学报, 2010,24(2):135-140.
- [27] 廖菁菁,黄标,孙维侠,等. 农田土壤有效磷的时空变异及其影响因素分析:以江苏省如皋市为例[J]. 土壤学报, 2007,44(4):620-628.
- [28] Pan Fujing, Zhang Wei, Liu Shujuan, et al. Leaf N:P stoichiometry across plant functional groups in the karst region of southwestern China[J]. *Trees-structure and Function*, 2015,29(3):883-892.
- [29] Tessier J T, Raynal D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2003,40(3):523-534.
- [30] 银晓瑞,梁存柱,王立新,等. 内蒙古典型草原不同恢复演替阶段植物养分化学计量学[J]. 植物生态学报, 2010,34(1):39-47.