

深圳市级自然保护区土壤化学计量特征与植物多样性的相关性*

谭琳¹ 刘梦芸² 甘先华² 张卫强²
黄钰辉² 陶玉柱² 周毅²

(1. 广东省林业科技推广总站, 广东广州 510173; 2. 广东省森林培育与保护利用重点实验室 / 广东省林业科学研究院, 广东广州 510520)

摘要 研究分析了深圳市3个市级自然保护区的土壤化学计量特征与植物多样性的相关性, 结果表明: 植物多样性指数多与土壤表层的C、N、P化学计量比显著相关, 但相关性较为复杂。其中大鹏自然保护区的植物均匀度指数(E)和田头山自然保护区的植物丰富度指数(R)与土壤表层的C、N、P化学计量比呈显著的正相关性。但田头山自然保护区植物多样性指数(H')、优势度指数(S)、均匀度指数(E)指数与土壤表层的C:P和N:P显著负相关。而铁岗—石岩湿地自然保护区的植物多样性指数与土壤C、N、P化学计量比均没有显著的相关性。

关键词 深圳市; 自然保护区; 化学计量比; 植物—土壤反馈

中图分类号: S722.5 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053(2020)06-0020-06

Correlation on Soil Stoichiometric Characteristics and Plant Diversity Indices in Nature Reserve in Shenzhen

TAN Lin¹ LIU Mengyun² GAN Xianhua² ZHANG Weiqiang²
HUANG Yuhui² TAO Yuzhu² ZHOU Yi²

(1. Guangdong Provincial Forestry Science and Technology Extension Station, Guangzhou, Guangdong 510173, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization / Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China)

Abstract This paper analyzed the relationships between soil stoichiometric characteristics and plant diversity indices in three nature reserves in Shenzhen. The results showed the relationships between soil stoichiometric characteristics and plant diversity indices are complicated, and most significant relationships happened in shallow soil (0-20 cm). The evenness index in Dapeng nature reserve and the plant species richness in Tiantoushan nature reserve were positively correlated with soil stoichiometry characteristics in shallow depth (0-20 cm) significantly. While the diversity index, plant dominance index, and evenness index were negatively correlated with soil C:P and N:P (0-10 cm) in Tiantoushan nature reserve significantly. In Tiegang-shiyan nature reserve, there were no significant relationships between soil stoichiometric and plant diversity indices.

Key words Shenzhen; nature reserve; stoichiometry; plant-soil feedback

* 基金项目: 广东省林业科技创新平台项目(2020-KYXM-09); 林业科技创新平台运行补助项目(2020132051); 沿海防护林功能性结构恢复重建技术研究与示范(2018KJCX011); 饮用水源区桉树林改造与质量提升研究与示范(2020STC-03)。

第一作者: 谭琳(1978—), 女, 工程师, 主要从事林业相关研究, E-mail: 596601705@qq.com。

通信作者: 刘梦芸(1987—), 女, 助理研究员, 主要从事森林生态学研究, E-mail: 56888254@qq.com。

生态化学计量通常指的是有机体的元素组成, 主要强调的是活有机体的主要组成元素(特别是 C、N、P) 的关系^[1]。生态化学计量学的基本原理之一, 就是种内不同发育阶段之间, 以及群落和生态系统不同组成物种之间对 C、N、P 等多种元素要求的差异, 这种差异引起不同层次上资源“供应—需求”之间的错配或矛盾, 从而调节生理和生态学过程^[2]。生物体与生物体之间、生物体与非生物环境之间的相互作用方式不仅会受到相关生物体对元素需求的强烈影响, 也会受到周围环境化学元素平衡状况的影响^[3]。

土壤和植被作为地上和地下生态系统的一部分, 二者相辅相成、互相影响^[4-5]。土壤 C:N:P 计量比能够反应土壤肥力和指示植物营养状况, 且土壤 C、N、P 各元素之间的耦合变化能够影响植被的生长和分布^[6], 这可能与土壤矿化作用有关^[6-7]。但土壤在时空上具有高度异质性, 因而土壤元素化学计量比受到土壤类型、植被群落特征等因素地强烈影响^[8]。以往的研究结果表明, 土壤养分与群落组分和物种多样性之间的关系较为复杂, 有研究表明随土壤养分的增加, 物种多样性可能降低, 也可能先增加后降低, 或二者之间没有相关性, 因为不同功能群植物对土壤养分变化的响应不同^[9]。

本研究通过对深圳市 3 个市级自然保护区进行植被多样性的调查, 同时结合土壤 C、N、P 化

学计量比, 了解不同自然保护区环境条件下土壤化学计量特征与植被多样性的相关性。旨在为自然保护区的恢复治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

深圳大鹏半岛市级自然保护区位于深圳市东部的大鹏半岛, 范围横跨龙岗区葵涌、大鹏和南澳 3 个街道的辖区, 包括笔架山和排牙山山地森林, 以及坝光银叶树红树林湿地、东涌红树林湿地、西涌香蒲桃林等区域, 总面积 146.22 hm², 于 2010 年 11 月获市政府批准成立。深圳田头山自然保护区位于深圳东部坪山新区, 东北邻惠州市, 东南接葵涌街道办, 距离深圳市中心 32 km, 于 2013 年 2 月获市政府批复。深圳铁岗—石岩湿地自然保护区位于深圳市西部, 宝安区、光明新区和南山区交界, 于 2013 年 2 月批准成立, 总面积 5 331.22 hm², 包括铁岗水库、石岩水库及其一、二级水源保护区。其中, 大鹏半岛自然保护区和田头山自然保护区的土地利用均以林地为主(比例超过 90%); 铁岗—石岩湿地保护区以林地、耕地和水域为主(表 1)。

1.2 植物多样性调查

2018 年 10—11 月在大鹏半岛市级自然保护区、田头山市级自然保护区、铁岗—石岩市级湿地自然保护区分别建立 4 个面积为 900 m² 的样地,

表 1 市级自然保护区整体土地利用类型面积
Table 1 The area of land-use type for nature reserve in Shenzhen hm²

自然保护区 Nature reserve	年份 Year	耕地 Cropland	林地 Woodland	草地 Lawn	水域 Water area	建设用 land Construction land
大鹏半岛自然保护区 Dapeng nature reserve	1995	320.79	13 111.31	457.64	164.11	351.50
	2005	465.77	13 059.86	329.25	226.10	324.36
	2015	300.72	13 216.15	323.09	244.35	321.04
田头山自然保护区 Tiantoushan nature reserve	1995	0.03	1 902.84		64.10	67.30
	2005	8.38	1 883.74		66.82	75.33
	2015	10.07	1 897.51		59.24	67.45
铁岗—石岩湿地保护区 Tiegang-shiyan nature reserve	1995	1 839.18	1 609.96	154.41	1 022.66	705.01
	2005	1 536.46	2 446.54	174.26	775.67	398.29
	2015	1 258.97	2 246.40	291.14	972.38	562.33

规格为 30 m × 30 m。在各样地调查胸径 1.0 cm 以上所有木本植物, 调查乔木指标为种类、坐标、胸径、树高、冠幅、枝下高等。在调查样方内设置 5 m × 5 m 和 1 m × 1 m 的小样方, 调查灌木种类、高度、基径、冠幅、盖度株数等参数, 调查草本种类、高度、盖度等参数。同时还测定各样地的坡向、坡度、坡位、海拔等环境因子。

1.3 土壤样品采集与分析

于每个样地中心随机选择 3 处采集 0~20 cm 土层土样, 将这 3 处土样混合为一个待测土样。然后将土样在室内通风处风干后除去植物根系、碎石等杂物, 磨碎后过筛, 测定其理化性质。其中, 土壤 pH 值采用土水质量比 1:2.5 电位法测定; 土壤有机质采用重铬酸钾外热氧化法测定; 全氮采用凯氏定氮法测定; 全磷采用 NaOH- 熔融—钼锑抗比色法测定^[10]。

1.4 植被多样性指数的计算

Patrick 丰富度指数: $R = S$

Simpson 优势度指数: $D = -\sum P_i^2$

Shannon-Wiener 多样性指数: $H' = -\sum P_i \ln P_i$

Pielou 均匀度指数: $E = H / \ln S$

式中, S 为群落中物种数目, N 为个体总数。 P_i 为抽样种的个体数占群落中总个体数的比例^[11]。

1.5 数据处理

首先, 使用 one-way ANOVA 分析各个自然保护区土壤层次对土壤 C:N、C:P、N:P 的影响, 并用 Tukey HSD 法检验均值差异显著性。其次, 用 Pearson 相关分析法分析各保护区土壤化学计量比与植被多样性指数的相关关系。以上均用 R 3.3.6

统计软件进行分析。

2 结果与分析

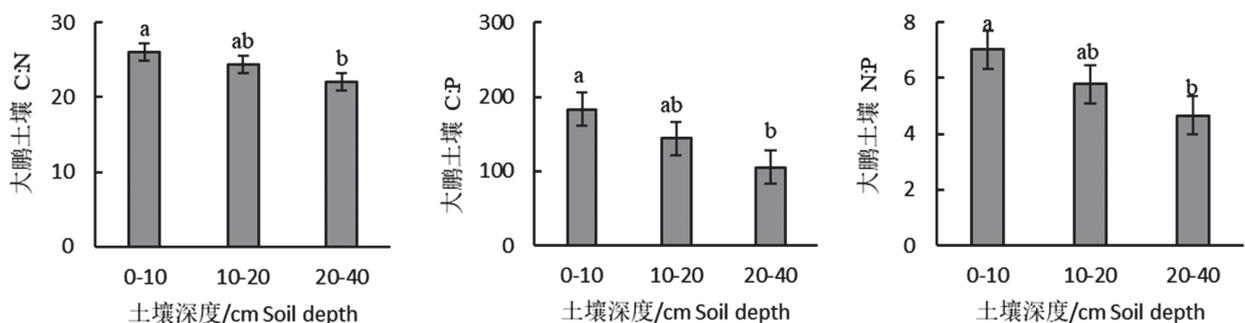
2.1 深圳市自然保护区土壤养分的化学计量比特征

大鹏自然保护区土壤 C:N 的变化范围是 16~32, C:P 为 54~272, N:P 为 3~10, 土壤各个层次之间的化学计量比特征差异显著。C:N 的变化范围是 18~43, C:P 为 42~229, N:P 为 2~8, 土壤各个层次之间的化学计量比差异显著。铁岗—石岩湿地自然保护区土壤 C:N 的变化范围是 22~41, C:P 为 18~173, N:P 为 1-5, 除了 C:N 在不同土壤层次之间无差异显著之外, C:P 和 N:P 在不同土壤层次之间差异显著。

由图 1-2 可知, 大鹏自然保护区和田头山自然保护区的土壤 C:N、C:P、N:P 均随着土壤层次的加深而逐渐降低。其中, 表层土壤 (0~10 cm) 的化学计量比显著高于深层 (20~40 cm) 土壤的化学计量比, 且 C:P 差异最大。由图 3 可知, 田头山自然保护区的土壤 C:P 和 N:P 均随着土壤层次的加深而逐渐降低。和另外两个自然保护区一样, 不同土壤层次之间的 C:P 差异最大。

2.2 土壤化学计量比与植物多样性指数的 Pearson 相关分析

由表 2 可以看出, 大鹏自然保护区的 Pielou 均匀度指数与土壤 (0~20 cm) C:N, 以及 10~20 cm 的 C:P 正显著相关。表 3 可以看出, 田头山自然保护区的植物种类丰富度指数与土壤表层 (0~10 cm) 的 C:N、C:P、N:P 均呈显著的正相关关系。而 Shannon 多样性指数、Simpson 优势度指数、Pielou 均匀度指数均与土壤表层的 C:N、

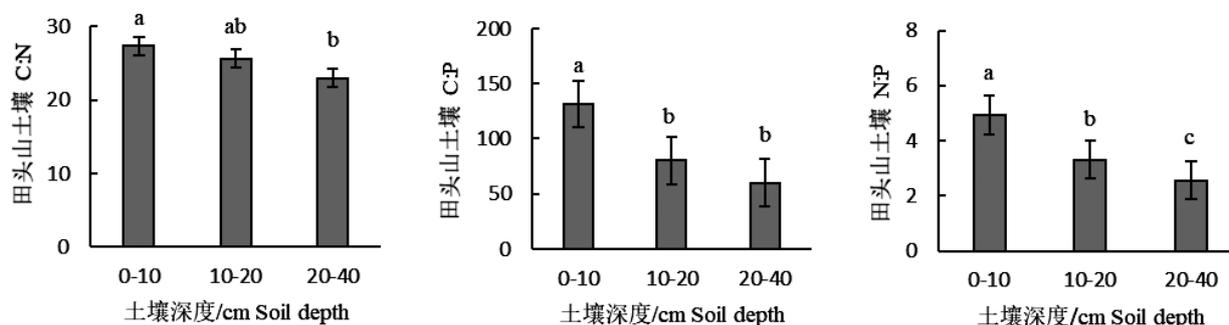


注: 不同字母表示不同土层间化学计量特征差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: different letters indicated significant differences among different soil depth ($P < 0.05$).

图 1 大鹏自然保护区不同土壤层次的化学计量比特征

Figure 1 The soil stoichiometric characteristics in different soil depth in Dapeng nature reserve

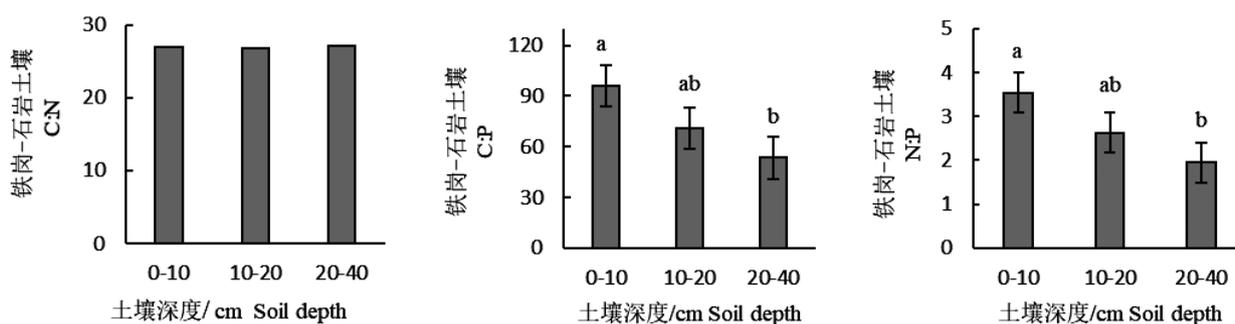


注：不同字母表示不同土层间化学计量特征差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: different letters indicated significant differences among different soil depth ($P < 0.05$).

图2 田头山自然保护区不同土壤层次的化学计量特征

Figure 2 The soil stoichiometric characteristics in different soil depth in Tiantoushan nature reserve



注：不同字母表示不同土层间化学计量特征差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: different letters indicated significant differences among different soil depth ($P < 0.05$).

图3 铁岗-石岩湿地自然保护区不同土壤层次的化学计量特征

Figure 3 The soil stoichiometric characteristics in different soil depth in Tiegang-shiyan nature reserve

C:P、N:P 呈显著的负相关关系。表4可以看出，铁岗-石岩自然保护区的植物多样性指数与土壤化学计量比没有显著的相关关系。

3 结论与讨论

3.1 本研究结果显示自然保护区的土壤 C、N、P 化学计量特征均随着土壤层次的加深而降低。大鹏自然保护区表层土 (0~10 cm) 的 C:N、C:P、N:P 分别是 26.2、180.0、6.9，深层土 (20~40 cm) 分别是 22.8、103.8、4.54，均高于中国土壤 (均值分别为 12.3、52.6 和 4.2) 的研究结果^[12-13]。田头山自然保护区表层土 (0~10 cm) C:N、C:P、N:P 分别是 27.8、131.3、4.7，深层土 (20~40 cm) 分别是 23.1、59.9、2.6，除了深层土的 N:P 低于全国土壤的研究结果，其余均高于中国土壤的研究结果^[12-13]。铁岗-石岩自然保护区表层土 (0~10 cm) C:N、C:P、N:P 分别是 27.1、94.4、3.5，深层土

(20~40 cm) 分别是 27.4、52.3、1.9，土壤的 N:P 明显低于中国土壤的研究结果^[12-13]。一般来说，土壤有机 C 及 N 作为结构性成分，其在土壤中积累和消耗存在相对固定的比值，因此 C:N 较为稳定且在 3 个自然保护区中差距不大。土壤全 P 主要受土壤母质的影响，其变异性较小，而有机 C 和全 N 除受土壤母质的影响外，还受凋落物分解及植物根系输入的影响^[14-15]，因此土壤 C:P 和 N:P 的变化则主要受土壤 C、N 的影响。通常土壤 C:N 和 C:P 与土壤有机质分解速率呈反比关系，较高的 C:N 和 C:P 代表较慢的有机质分解速率，以及较低的土壤 N、P 的有效性^[8,16]。在 3 个自然保护区中，大鹏自然保护区 C:N 最低，C:P 和 N:P 最高，说明了大鹏自然保护区土壤有着较快的有机质分解速率和较高的土壤 N 有效性。铁岗-石岩自然保护区的 C:P 和 N:P 最低，说明该保护区土壤的 N 有效性较低，土壤较为贫瘠。

表2 大鹏自然保护区土壤化学计量特征和植物多样性的 Pearson 相关分析

Table 2 The Pearson correlation analysis of soil stoichiometric characteristics and plant diversity indices in Dapeng nature reserve

土壤层次 /cm Soil depth	化学计量比 Stoichiometric ratio	丰富度 Richness	香农 - 维纳指数 Shannon-Wiener	辛普森指数 Simpson	皮耶罗指数 Pielou
0~10	C:N	-0.22	0.28	0.46	0.60*
0~10	C:P	-0.41	-0.04	0.2	0.42
0~10	N:P	-0.37	-0.16	0.03	0.23
10~20	C:N	-0.32	0.21	0.41	0.63*
10~20	C:P	-0.21	0.3	0.4	0.59*
10~20	N:P	-0.11	0.27	0.3	0.43
20~40	C:N	-0.11	0.23	0.2	0.42
20~40	C:P	0.01	0.38	0.23	0.44
20~40	N:P	0.01	0.35	0.17	0.4

注: *表示 $P < 0.05$ 。Note: * indicated $P < 0.05$.

表3 田头山自然保护区土壤化学计量特征和植物多样性的 Pearson 相关分析

Table 3 The Pearson correlation analysis of soil stoichiometric characteristics and plant diversity indices in Tiantoushan nature reserve

土壤层次 /cm Soil depth	化学计量比 Stoichiometric ratio	丰富度指数 Richness	香农 - 维纳指数 Shannon-Wiener	辛普森指数 Simpson	皮耶罗指数 Pielou
0~10	C:N	0.54*	-0.35	-0.34	-0.38
0~10	C:P	0.63**	-0.74**	-0.73**	-0.76***
0~10	N:P	0.51*	-0.75***	-0.74***	-0.75***
10~20	C:N	-0.11	0.18	0.18	0.18
10~20	C:P	0.07	0.17	-0.17	0.17
10~20	N:P	0.16	0.34	-0.35	-0.34
20~40	C:N	0.33	0.00	-0.01	-0.03
20~40	C:P	0.52*	0.38	-0.37	-0.41
20~40	N:P	0.33	0.43	-0.42	-0.43

注: *表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$, ***表示 $P < 0.001$ 。
Note: * indicated $P < 0.05$, ** indicated $P < 0.01$, *** indicated $P < 0.001$.

表4 铁岗—石岩湿地自然保护区土壤化学计量特征和植物多样性的 Pearson 相关分析

Table 4 The Pearson correlation analysis of soil stoichiometric characteristics and plant diversity indices in Tiegang-shiyan nature reserve

土壤层次 /cm Soil depth	化学计量比 Stoichiometric ratio	丰富度 Richness	香农 - 维纳指数 Shannon-Wiener	辛普森指数 Simpson	皮耶罗指数 Pielou
0~10	C:N	-0.36	-0.44	-0.42	-0.4
0~10	C:P	0.02	-0.10	-0.06	-0.17
0~10	N:P	0.11	0.01	0.04	-0.08
10~20	C:N	-0.14	-0.12	-0.17	-0.08
10~20	C:P	-0.08	-0.12	-0.1	-0.05
10~20	N:P	-0.07	0.00	-0.09	0.05
20~40	C:N	0.31	0.35	0.30	0.29
20~40	C:P	0.28	0.41	0.33	0.43
20~40	N:P	0.22	0.34	0.28	0.36

3.2 植物多样性与土壤特征的变化密切相关^[17], 本研究中不同自然保护区的植物多样性指数与其土壤 C、N、P 化学计量比的相关性有明显的空间异质性, 显示了深圳市级自然保护区植物与土

壤的相互调控作用适应环境变化的重要生态学策略^[18]。本研究结果可以看出, 大鹏自然保护区的 Pielou 均匀度指数与土壤表层的 C:N 和 C:P 正显著相关, 而田头山自然保护区的植物种类丰富

度与土壤 C:N、C:P、N:P 均呈显著的正相关关系, 表明地上植物群落多样性影响土壤中 C 元素和 N 元素的构成比例^[18]。土壤 N:P 反映土壤肥沃程度, 直接影响土壤养分的生物利用有效性, 同时也是衡量生境营养元素限制的一个重要指标。在田头山自然保护区, Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数、Pielou 均匀度指数均与 C:N、C:P、N:P 呈显著的负相关性, 反映出该保护区环境中土壤有机质分解速度的加快对植物群落多样发展的正向促进作用。可能原因是 N 元素的增加导致优势植物快速生长, 进而对其他物种竞争排斥, 导致物种多样性降低^[6,19]。表 4 可以看出, 铁岗—石岩湿地自然保护区的植物多样性与土壤化学计量比没有显著的相关关系, 说明该保护区土壤养分含量暂时对植被的生长没有限制性效应。因为在较低肥力土壤中, 群落的物种丰富度变化受限制性养分的影响^[20]。

3.3 本研究中, 田头山自然保护区的土壤化学计量比与植物多样性各指标相关性较强, 而大鹏自然保护区次之, 铁岗—石岩湿地自然保护区最弱, 空间上的差异性可能与种间差异利用资源有效性而形成的生境补偿机制及环境因子的综合影响有关。虽然田头山自然保护区和大鹏自然保护区均以林地为主, 但田头山的植被保护情况最好, 而大鹏自然保护区因为受到海风和盐雾胁迫导致植被明显低矮。铁岗—石岩自然保护区主要以人工林和草地为主, 土壤也较为贫瘠。综上, 在深圳市级自然保护区的植被恢复过程中, 需针对不同的保护区实施相应的技术措施。针对大鹏自然保护区可考虑从树种的优化和筛选的角度出发, 增加植物的多样性和优化群落结构, 适当增植更抗海风和耐盐雾树种, 实现从植物到土壤的逐步提升。而针对铁岗—石岩保护区的植被恢复更应注重土壤养分的提升, 适当增施氮肥, 实现从土壤质量提升到植物更加多样化的逐步改进。

参考文献

[1] 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索[J]. 植物生态学报, 2005, 29(6): 1007-1019.
 [2] ELSEL JJ, URABE J. The stoichiometry of consumer-driven nutrient recycling: theory, observations, and consequences[J]. Ecology, 1996, 80, 735-751.
 [3] ELSEL J J, DOBBERFUHL D R, MACKAY N A. Organ-

ism size, life history, and N: P stoichiometry[J]. *Bioscience*, 46: 674-684.
 [4] 洗杆标, 黄钰辉, 洗伟光, 等. 华南人工林乔木树种叶片氮、磷、硫生态化学计量特征[J]. 广东林业科技, 2015, 31(5): 28-34.
 [5] 肖石红, 张卫强, 黄钰辉, 等. 深圳铁岗—石岩市级湿地自然保护区典型次生林物种多样性与土壤化学性质[J]. 林业与环境科学, 2020, 36(4): 35-40.
 [6] 刘晓琴, 张翔, 张立锋, 等. 封育年限对高寒草甸群落组分和物种多样性的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(16): 5150-5162.
 [7] SMALL C J, MCCARTHY B C. Relationship of understory diversity to soil nitrogen, topographic variation, and stand age in an eastern oak forest, USA [J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 217(2/3): 229-243.
 [8] 宁志英, 李玉霖, 杨红玲, 等. 沙化草地土壤碳氮磷化学计量特征及其对植被生产力和多样性的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(10): 3537-3546.
 [9] 王长庭, 龙瑞军, 刘伟, 等. 高寒草甸不同群落类型土壤碳分布与物种多样性、生物量关系[J]. 资源科学, 2010, 32(10): 2022-2029.
 [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 1-495.
 [11] 陈芙蓉, 程积民, 刘伟, 等. 不同干扰对黄土区典型草原物种多样性和生物量的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(9): 2856-2866.
 [12] TIAN H Q, CHEN G S, ZHANG C, et al. Pattern and variation of C: N: P ratios in China's soils: a synthesis of observational data [J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98 (1/3): 139-151.
 [13] CLEVELAND C C, LIPTZIN D. C: N: P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? [J]. *Biogeochemistry*, 2007, 85 (3): 235-252.
 [14] 朱秋莲, 程曼, 安韶山, 等. 宁南山区植被恢复对土壤团聚体特征及腐殖质分布的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 247-251.
 [15] ZHANG Z S, XUE Z S, LYU X G, et al. Scaling of soil carbon, nitrogen, phosphorus and C: N: P ratio patterns in peatlands of China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2017, 27(4): 507-515.
 [16] 高君亮, 罗凤敏, 高永, 等. 农牧交错带不同土地利用类型土壤碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2019, 39(15): 5594-5602.
 [17] 杜艺, 邢鹏飞, 贾镇宁, 等. 北方农牧交错带赖草草地斑块的土壤化学计量特征对植物多样性的影响[J]. 草地学报, 2020, 28(3): 808-814.
 [18] 汪攀, 王霖姣, 盛茂银. 西南喀斯特石漠化生态系统植物多样、土壤生态化学计量特征及其相关性分析[J]. 南方农业学报, 2018, 49 (10): 1959-1969.
 [19] ROEM W J, BERENDSE F. Soil acidity and nutrient supply ratio as possible factors determining changes in plant species diversity in grassland and heathland communities [J]. *Biological Conservation*, 2000, 92 (2): 151-161.
 [20] 石红霄, 候向阳, 帅尚礼, 等. 高山嵩草草甸初级生产力、多样性与土壤因子的关系[J]. 草业科学, 2015, 24(10): 40-47.