

DOI: 10.5846/stxb201711242094

宁志英,李玉霖,杨红玲,张子谦,张建鹏.沙化草地土壤碳氮磷化学计量特征及其对植被生产力与多样性的影响.生态学报,2019,39(10): - .
Ning Z Y, Li Y L, Yang H L, Zhang Z Q, Zhang J P. Stoichiometry and effects of carbon, nitrogen, and phosphorus in soil of desertified grasslands on community productivity and species diversity. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(10): - .

沙化草地土壤碳氮磷化学计量特征及其对植被生产力与多样性的影响

宁志英^{1,2}, 李玉霖^{1,*}, 杨红玲^{1,2}, 张子谦^{1,2}, 张建鹏^{1,2}

1 中国科学院西北生态环境资源研究院奈曼沙漠化研究站, 兰州 730000

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:沙化草地土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)化学计量特征及其对植被生产力与多样性的影响对于认识草地沙漠化过程中土壤与植被的互馈关系,以及沙漠化发展的生态学机理具有重要的意义。通过对科尔沁沙地 75 个沙化样地的野外调查,研究了科尔沁沙地不同程度沙化草地的表层土壤 C、N、P 化学计量特征及其与生产力和多样性的相关关系。结果表明:1)科尔沁沙地沙化草地表层土壤具有较低的有机 C、全 N、全 P 含量及 C:N、N:P 和 C:P,平均值分别为 1.39 mg/g、0.117 mg/g、0.079 mg/g 和 7.50、2.22、16.91;草地沙漠化过程中,土壤有机 C、全 N、全 P 含量显著降低的同时,C:N、N:P 和 C:P 亦显著降低,表明土壤有机 C、全 N、全 P 在沙漠化过程中的损失是不同步的;2)科尔沁沙地沙化草地表层土壤有机 C、全 N、全 P 元素间均呈显著正相关,具有一定的耦合关系,且土壤有机 C 和全 P 间的耦合关系不随沙漠化的发展而发生改变;3)草地沙化过程中,土壤养分的损失限制着草地生产力,而土壤 N:P 较全 N、全 P 含量更能反映土壤养分对生产力的限制作用;4)沙化草地土壤全 N 含量与物种丰富度间具有显著正相关关系,而土壤全 P 含量与其无显著相关性;多样性指数与全 N、全 P 含量间均具有显著正相关关系;相对于土壤全 N、全 P 含量,N:P 能更好地反映养分平衡对物种多样性的影响作用。

关键词:科尔沁沙地;生态化学计量学;土壤;生产力;物种多样性

Stoichiometry and effects of carbon, nitrogen, and phosphorus in soil of desertified grasslands on community productivity and species diversity

NING Zhiying^{1,2}, LI Yulin^{1,*}, YANG Hongling^{1,2}, ZHANG Ziqian^{1,2}, ZHANG Jianpeng^{1,2}

1 Naiman Desertification Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resource, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Information on the stoichiometry of carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) in soils and its effects on community productivity and species richness in desertified grassland is essential to understanding the interactive relationship between soil and vegetation in the process of grassland desertification, and reveals the ecological mechanisms of land desertification. In this study, we measured organic C, total N, total P concentrations, and C:N, N:P, C:P in the topsoil of different desertified grasslands in the Horqin sandy land, and statistically analyzed the correlations among C, N, and P stoichiometry, community productivity, and species diversity. The results showed that the concentrations of organic C (1.39 mg/g), total N (0.117 mg/g), and total P (0.079 mg/g), and the C:N (7.50), N:P (2.22), and C:P (16.91) ratios in the topsoil of desertified grasslands remained at relatively low levels in contrast to the results nationwide or worldwide. It was not surprising that soil C, N, and P significantly decreased during grassland desertification. Their ratios, however, also

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0500907);国家自然科学基金(31270501 41471083)

收稿日期:2017-11-24; **网络出版日期:**2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liyl@lzb.ac.cn

significantly decreased in the gradient of desertification, suggesting an asynchronous loss of soil C, N, and P in the process of desertification. We found that topsoil organic C, total N, total P, and their ratios were positively correlated, suggesting a coupling relationship among organic C, total N, and total P in topsoil in the study sites. Further, the coupling relationships between organic C and total P did not change with the development of grassland desertification. Expectedly, community productivity was limited by the loss of soil nutrients in desertified grassland in this study. However, soil N:P stoichiometry could explain more variations of community productivity than soil N or P concentration could. Similarly, correlation analysis showed that species richness was significantly correlated with soil N, but not P. The diversity index was significantly correlated with soil N and P. Compared with N or P concentration, the soil N:P stoichiometry effectively reflected the influence of nutrient balance on species diversity.

Key Words: Horqin sandy land; ecological stoichiometry; soil; community productivity; species diversity

碳(C)、氮(N)、磷(P)元素是生物有机体最重要的生源元素,对生态系统结构和功能具有重要作用^[1]。生态系统 C、N、P 元素及其化学计量关系一定程度上反映生态系统各组分(植物、凋落物和土壤)养分比例的形成机制。土壤作为生态系统重要的组成部分,其 C:N:P 与凋落物分解速率、土壤微生物数量以及土壤有机碳和养分的长期累积等紧密相关,是影响陆地生态系统初级生产力及群落结构的关键因素^[2-3]。

自然界土壤 C:N:P 一般具有较大的空间变异性,土壤类型、气候区、演替阶段等都是引起这种变异性的主要原因^[4]。沙漠化是由于人类活动和气候因素引起的土地退化现象。沙漠化造成土壤表层 C、N、P 等的大量流失^[5],对土壤 C:N:P 产生直接影响。同时,土壤养分流失造成土地生产力大幅下降,改变了地表植被凋落物和根系向土壤的输入和周转,间接影响土壤的 C、N、P 化学计量特征。而土壤 C、N、P 化学计量特征又反过来影响植被生产力和物种组成。可见,沙漠化过程中土壤 C:N:P 的变化不仅可以反映土壤不同养分损失的数量关系,而且有助于理解养分损失和生产力下降以及物种多样性丧失的互馈机制。然而,以往的研究多关注土壤 C、N、P 含量与生产力及物种多样性间的关系,而 C、N、P 化学计量比值与它们之间关系的研究仍较为缺乏^[6-8]。

科尔沁沙地由于其脆弱的生态环境及强烈的人类活动,成为我国北方农牧交错带沙漠化最严重的地区之一,在过去的几十年中,约 80%的地区发生了不同程度的沙漠化^[9]。在这一地区的研究发现,草地沙化影响植被生产力、植物群落结构及土壤有机质的累积及分解速率,进而影响生态系统 C、N、P 循环^[8, 10-11]。研究不同程度沙化草地土壤 C:N:P 特征及其对植被生产力与多样性的影响,有助于理解草地沙化过程中土壤与植被的互馈关系。因此,本文以科尔沁沙化草地为研究对象,通过调查不同程度沙化草地表层土壤有机 C、全 N、全 P 含量、植被生产力及物种丰富度,旨在研究:1)沙化草地表层土壤有机 C、全 N、全 P 化学计量特征;2)不同程度沙化草地植被生产力及物种多样性的差异;3)沙化草地表层土壤 C:N:P 与植被生产力及物种多样性间的相关关系。为进一步认识沙质草地生态系统功能及其稳定维持机制和沙漠化发展的生态学机理提供科学依据,以此为沙化草地的恢复、重建及管理提供理论基础。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

科尔沁沙地(113.5°—123.5°E, 42.3°—44.5°N, 海拔 180—650 m)位于中国东北部西辽河冲积—湖积平原地区,处于内蒙古高原向东北平原的过渡地带,总面积约 5.06 万 km²。科尔沁沙地属大陆性半干旱、半湿润季风气候,全年日照时数约 2900—3100 h,年平均气温 5.8—6.4℃,≥10℃的积温为 3000—3200℃,无霜期 140—160 天。年均降水量 343—451 mm,其中 70%集中于夏季,年蒸发量 1500—2500 mm。年平均风速 3.5—4.5 m/s,春季平均风速 4.2—5.9 m/s,风速≥17 m/s 的大风日数有 25—40 d,其中沙尘暴天气 10—15 d,主要出现在春季。

科尔沁沙地地貌特征是缓起伏沙地、流动沙丘、半固定沙丘、固定沙丘与丘间低地镶嵌分布的现代风沙地貌景观。植被为典型的沙地疏林草原植被,分布在流动沙丘上的主要植物种有沙米(*Agriophyllum squarrosum*)、狗尾草(*Setaria viridis*)和稀疏分散的差巴嘎蒿(*Artemisia halodendron*);半固定沙丘优势种有小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)和差巴嘎蒿,伴生有一年生的狗尾草、猪毛菜(*Salsola collina*)和雾滨藜(*Bassia hyssopifolia*)等;固定沙丘优势种有小叶锦鸡儿及一年生的黄蒿(*Artemisia scoparia*)、狗尾草、猪毛菜和尖头叶藜(*Chenopodium acuminatum*)等;丘间低地优势种有小叶锦鸡儿、冷蒿(*Artemisia frigida*)、杠柳(*Periploca sepium*)等灌木和半灌木以及狗尾草、猪毛菜、黄蒿、地梢瓜(*Cynanchum thesioides*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、胡枝子(*Lespedeza davurica*)和扁蓿豆(*Melissitus ruthenicus*)等一年生和多年生的杂类草。土壤以风沙土为主,土壤的机械组成中粒径为 1—0.25 mm 的粗砂占 20%—58%,粒径为 0.25—0.05 mm 的细砂占 40%—67%,粒径<0.05 mm 的粘粉粒占 0.1%—15%,土壤有机质含量为 0.08%—0.49%。

1.2 研究方法

1.2.1 样地布设

在科尔沁沙地内由东南向西北方向布设 75 个调查样地(图 1)。根据植被盖度、物种组成及流沙面积等将调查样地划分为重度沙漠化、中度沙漠化和轻度沙漠化 3 种类型^[12]。75 个样地中,22 个可以划分为重度沙漠化样地,24 个可以划分为中度沙漠化样地,29 个可以划分为轻度沙漠化样地。

1.2.2 取样及测试方法

在每个调查样地上设置一条 100 m 的样线,样线上每 20 m 分别设置 1 个 5 m×5 m 的灌木调查样方和 1 m×1 m 的草本调查样方。在灌木样方内,调查所有灌木冠幅(长×宽)和高度,采用灌木标准株法计算灌木地上、地下生物量。灌木地上、地下生物量通过在研究区域内完整挖取每种灌木 30 棵植株,解析灌木冠幅(长×宽)和高度与地上、地下生物量的关系,建立回归方程求得。在草本样方内,统计植被的物种组成并采用收获法收集地上植物活体,带回室内烘干测定地上生物量,用直径 8 cm 的根钻分 7 层(0—5—10—20—30—50—70—100 cm)采集土体,每个样方内取 3 钻并分层混合,带回室内手工拣出土体中草本植物根系,冲洗干净并烘干测定地下生物量。重度沙漠化样地共调查了 105 个样方,中度沙漠化样地共调查了 118 个样方,轻度沙漠化样地共调查了 143 个样方。同时在 5 m×5 m 样方内用土钻随机采集 5 处 0—10 cm 土样,混合均匀并带回室内测定土壤有机 C、全 N、全 P 含量。土样带回室内风干后,手工拣出杂物、凋落物和植物根系并研磨过筛。用 C/N 元素分析仪(Costech ECS4010, Milan, Italy)测定土壤全 C 和全 N 含量,用总无机碳分析仪(UIC CM140)测定土壤总无机 C,土壤有机 C 含量由全 C 含量减去总无机 C 含量获得,采用钼锑抗比色法测定土壤全 P 含量。

1.2.3 数据分析

土壤有机 C、全 N、全 P 采用质量含量,C:N、N:P、C:P 及 C:N:P 均采用质量比。结合草本样方和灌木样方生物量数据,通过单位面积平均的方法获得调查样地的生物量。采用 One-way ANOVA 和 LSD 最小显著性差异法比较不同类型沙化草地之间植被生产力、物种丰富度、多样性指数,及土壤有机 C、全 N、全 P 化学计量特征值的差异。采用相关分析揭示植被生产力、物种丰富度、多样性指数,及土壤有机 C、全 N、全 P 化学计量特征值之间的相关性。采用 General linear model 检验不同线性相关关系的斜率及截距是否有差异。为了满足正态分布的要求,首先对数据进行自然对数转换,然后进行 ANOVA 假设检验、相关和回归分析。数据的正态分布采用 One Sample Kolmogorov-Smirnov 进行检验。

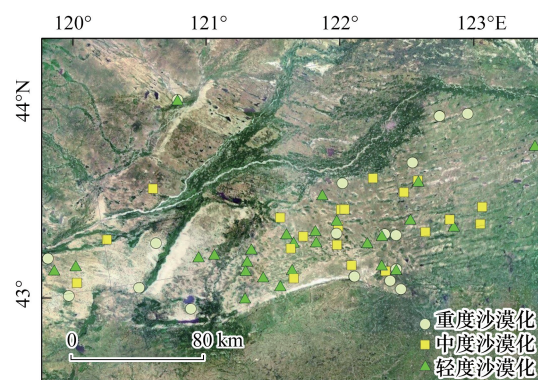


图 1 科尔沁沙地 75 个调查样地分布图

Fig.1 Distribution of 75 sample sites in Horqin sandy land

多样性指数包括 Simpson 指数和 Shannon-Wiener 指数,计算方法如下:

$$\text{Simpson 指数}, D = 1 - \sum_{i=1}^s (P_i)^2; \text{Shannon-Wiener 指数}, H = - \sum_{i=1}^s (P_i \ln P_i)。$$

式中, S 为物种数目, P_i 为种 i 的个体数占群落中总个体数的比例。

2 结果分析

2.1 沙化草地土壤 C、N、P 化学计量特征

科尔沁沙地 75 个调查样地表层土壤(0—10 cm)有机 C、全 N 和全 P 的变化范围分别为 0.32—9.40 mg/g、0.04—0.87 mg/g 和 0.00—0.180 mg/g,平均值分别为 (1.39 ± 1.13) mg/g、 (0.117 ± 0.10) mg/g 和 (0.079 ± 0.023) mg/g;化学计量比 C:N、N:P 和 C:P 的变化范围分别为 1.91—34.97、0.57—7.34 和 3.61—88.65,平均值分别为 7.50 ± 2.64 、 2.22 ± 0.90 和 16.91 ± 9.82 。土壤有机 C、全 N、全 P 含量及化学计量比值的变异系数在 29%—81%之间,属于中等变异(图 2)。

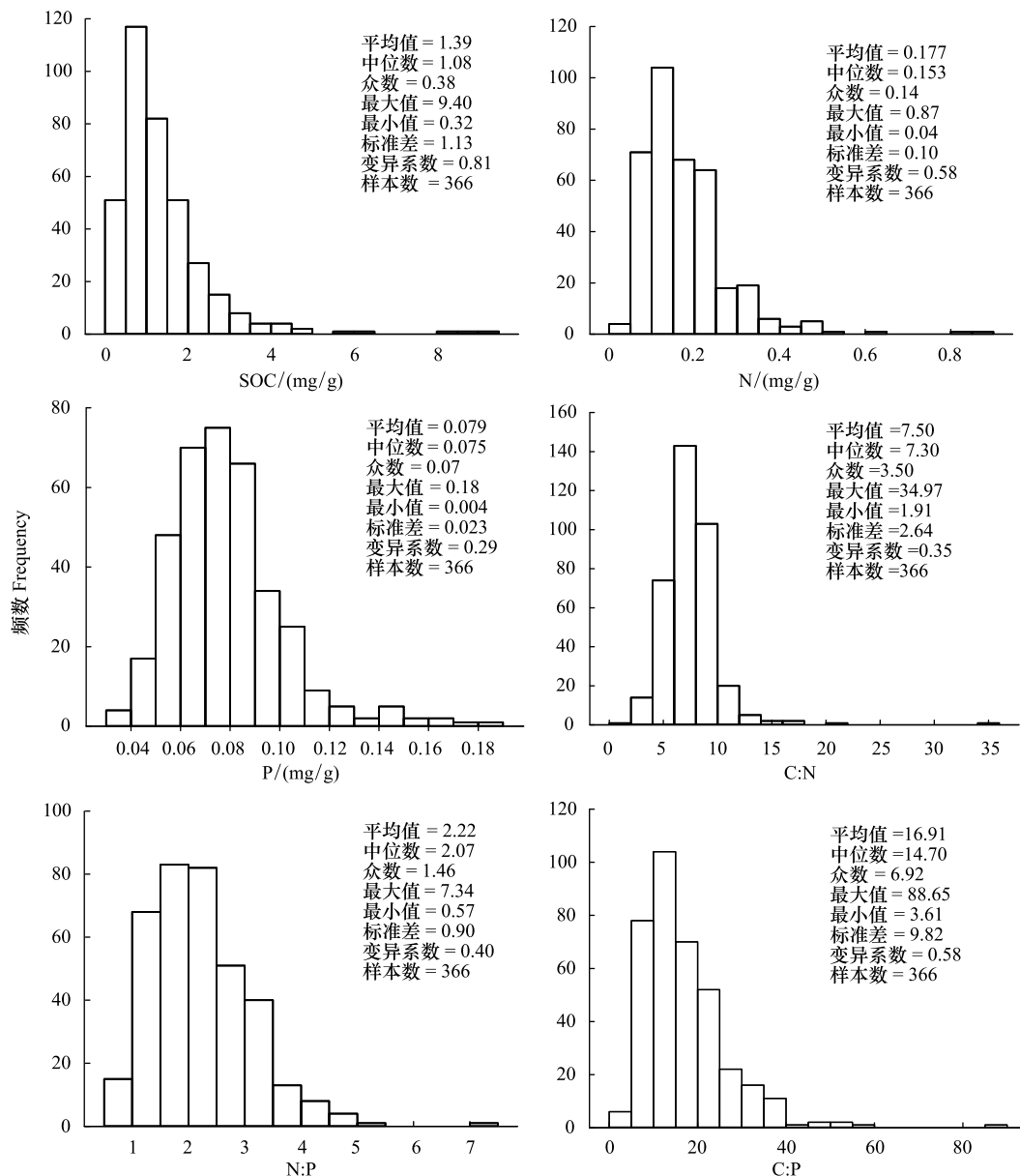


图 2 科尔沁沙化草地土壤(0—10 cm)SOC、N、P 及其比值的频数分布

Fig.2 Histogram of SOC, N, P concentrations and their ratios in soils (0—10 cm) of Horqin desertified grassland

科尔沁沙地不同程度沙化草地表层土壤有机 C、全 N、全 P 含量及其化学计量比存在显著差异 ($P<0.001$; 表 1)。重度沙化草地具有较低的有机 C、全 N、全 P 含量,分别较中度沙化草地降低了 31.93%、32.75% 和 9.10%,较轻度沙化草地降低了 58.88%、49.56% 和 18.60%;轻度沙化草地具有较高的 C:N、N:P、C:P,中度沙化草地分别较其减小了 17.40%、19.33% 和 34.78%,而重度沙化草地分别较其减小了 17.52%、39.40% 和 50.13%,说明沙化过程中土壤 C:N、N:P 和 C:P 具有降低的趋势。轻度沙化草地的 C:N:P 为 23:3:1,中度沙化草地的 C:N:P 为 15:2:1,而重度沙化草地的 C:N:P 为 12:2:1。

表 1 科尔沁沙地不同程度沙化草地土壤(0—10 cm)SOC、N、P 及其比值(平均值±标准误差)

Table 1 SOC, N, P concentrations and their ratios in soils (0—10 cm) along gradient of desertified grassland in Horqin Sand Land (mean ± SE)

含量及比值 Concentration and ratio	轻度沙化 Light degeneration	中度沙化 Moderate degeneration	重度沙化 Heavy degeneration	<i>F</i>	<i>P</i>
SOC/(mg/g)	1.97±1.107a	1.19±0.086b	0.81±0.061c	42.68	<0.001
N/(mg/g)	0.228±0.006a	0.171±0.009b	0.115±0.006c	45.43	<0.001
P/(mg/g)	0.086±0.002a	0.077±0.002b	0.070±0.002c	16.31	<0.001
C:N	8.39±0.19a	6.93±0.15 b	6.92±0.34b	14.33	<0.001
N:P	2.69±0.070a	2.17±0.077b	1.63±0.063c	57.31	<0.001
C:P	22.64±0.88a	14.96±0.67b	11.29±0.67c	54.58	<0.001
C:N:P	23:3:1	15:2:1	12:2:1	—	—

同一行数值得后的不同小写字母表示不同沙化程度草地间 0.05 水平上差异显著

2.2 沙化草地土壤 C、N、P 含量及其化学计量比值间的关系

科尔沁沙地沙化草地表层土壤有机 C 含量和全 N 含量($r_{\text{Total}}=0.876, P<0.001$)、全 N 含量和全 P 含量($r_{\text{Total}}=0.721, P<0.001$)以及有机 C 含量和全 P 含量($r_{\text{Total}}=0.683, P<0.001$)间总体上均呈极显著正相关关系(图 3)。并且,就同一沙化程度草地而言,土壤有机 C、全 N、全 P 含量也表现出相关关系,其中土壤有机 C 和全 P 含量间的耦合关系不随沙漠化的发展而变化($P_a=0.582, P_b=0.156$)。土壤有机 C 含量和 N:P($r_{\text{Total}}=0.641, P<0.001$)、全 N 含量和 C:P($r_{\text{Total}}=0.706, P<0.001$)以及全 P 含量和 C:N($r_{\text{Total}}=0.270, P<0.001$)间均表现出显著正相关关系,而中度和重度沙化草地土壤全 P 含量和 C:N 间并不存在显著相关性($r_{\text{MD}}=0.041, r_{\text{HD}}=0.081, P>0.05$)。

2.3 沙化草地植被生产力及物种多样性

科尔沁沙地不同程度沙化草地间生物量及物种多样性均存在显著差异($P<0.001$;表 2)。重度沙化草地具有较低的地上生物量、地下生物量和总生物量,分别较中度沙化草地低 47.43%、31.14% 和 36.71%,较轻度沙化草地低 50.33%、39.44% 和 42.99%。同时,沙化草地的地上/地下生物量比、物种丰富度及多样性指数亦随着沙漠化的发展显著降低($P<0.001$)。

科尔沁沙地沙化草地物种丰富度和生物量间可以用幂函数进行拟合及描述(图 4),地上生物量、地下生物量及总生物量均随着物种丰富度的增加而增加。而且,地上/地下生物量比亦随着物种丰富度的增加而呈幂函数增长趋势($y=0.58(1-e^{-0.47x})$, $R^2=0.072, P<0.0001$)。

2.4 土壤 C、N、P 化学计量特征与植被生产力及物种多样性的关系

科尔沁沙地沙化草地表层土壤有机 C、全 N 及全 P 含量均与地上生物量、地下生物量和总生物量呈显著正相关关系($P<0.01$;表 3),说明土壤有机 C、全 N、全 P 是影响植被生物量的关键因素。同时,土壤有机 C、全 N、全 P 含量与物种丰富度及多样性指数间也有显著正相关关系($P<0.01$;表 3),即土壤有机 C、全 N、全 P 会影响物种多样性。土壤 N:P、C:P 与植被生物量和物种丰富度、多样性指数间表现为显著正相关关系($P<0.01$;表 3),但 C:N 与生物量、物种丰富度,以及多样性指数间无显著相关性。

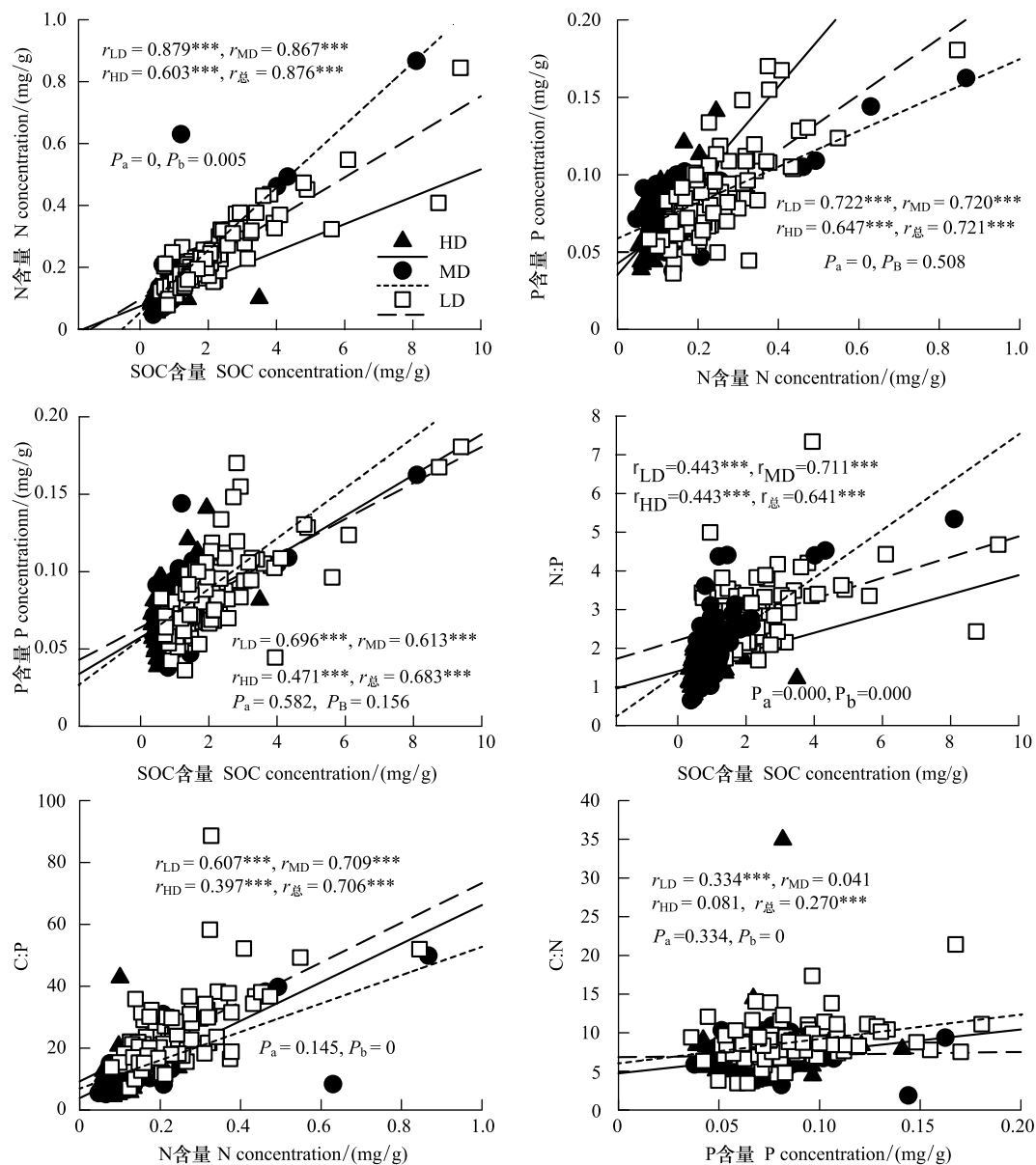


图3 科尔沁沙化草地土壤(0—10 cm)SOC、N、P 及其比值相关关系

Fig.3 Relationship between SOC, N, P concentrations and their ratios in soils (0—10 cm) of Kerqin desertified grassland

LD:轻度沙化,Light degeneration;MD:中度沙化,Moderate degeneration;HD:重度沙化,heavy degeneration;*, $P<0.05$; **, $P<0.01$; ***, $P<0.001$; $P_a<0.05$ 和 $P_b<0.05$ 分别表示三种线性相关关系的斜率和截距有显著差异

表2 不同程度沙化草地植被生产力及物种多样性(平均值±标准误差)

Table 2 Vegetation productivity and species diversity along desertification gradient of sandy grassland (mean ± SE)

沙漠化 Desertification	地上生物量 Aboveground biomass/ (g/m ²)	地下生物量 Underground biomass/ (g/m ²)	总生物量 Total biomass/ (g/m ²)	地上/地下 生物量 Above/ underground biomass ratio	物种丰富度 Species richness	Simpson 指数	Shannon- Wiener 指数
轻度沙化 Light degeneration	154.77±4.29a	319.67±8.54a	474.44±10.66a	0.56±0.029a	5.48±0.14a	0.50a	0.98a
中度沙化 Moderate degeneration	146.23±5.28a	281.14±5.61b	427.37±9.15b	0.52±0.017a	5.44±0.16a	0.52a	1.03a

续表							
沙漠化 Desertification	地上生物量 Aboveground biomass/ (g/m ²)	地下生物量 Underground biomass/ (g/m ²)	总生物量 Total biomass/ (g/m ²)	地上/地下 生物量 Above/ underground biomass ratio	物种丰富度 Species richness	Simpson 指数	Shannon- Wiener 指数
重度沙化 Heavy degeneration	76.87±5.73b	193.60±10.48c	270.47±14.90c	0.39±0.021b	3.66±0.18b	0.38b	0.70b
<i>F</i>	67.37	57.08	81.47	42.66	42.29	14.40	19.19
<i>P</i>	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

同一列数值后的不同小写字母代表不同沙化程度草地间 0.05 水平上差异显著

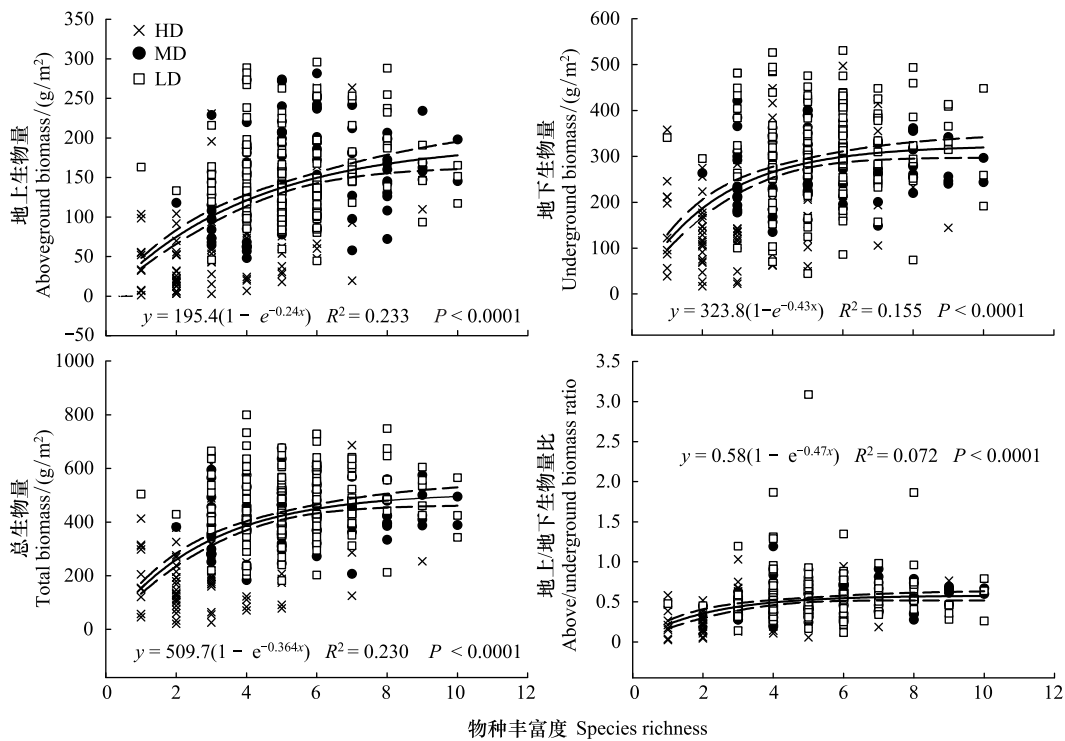


图 4 沙化草地植被生产力与物种丰富度之间的关系

Fig.4 Relationship between vegetation productivity and species richness in desertified grasslands
实线为拟合的回归线,虚线为 95%的置信区间

表 3 沙化草地土壤(0—10 cm)SOC、N、P 化学计量特征与植被生产力及物种多样性的关系

Table 3 Correlations between soil (0—10 cm) stoichiometry and vegetation productivity, species diversity in desertified grassland							
含量及比值 Concentration and ratio	地上生物量 Aboveground biomass/ (g/m ²)	地下生物量 Underground biomass/ (g/m ²)	总生物量 Total biomass/ (g/m ²)	地上/地下 生物量 Above/ underground biomass ratio	物种丰富度 Species richness	Simpson 指数	Shannon- Wiener 指数
SOC/(mg/g)	0.216 **	0.261 **	0.273 **	0.039	0.177 **	0.158 **	0.169 **
N/(mg/g)	0.329 **	0.354 **	0.385 **	0.047	0.235 **	0.175 **	0.189 **
P/(mg/g)	0.167 **	0.234 **	0.233 **	-0.052	0.1	0.119 *	0.124 *
C:N	-0.01	0.04	0.06	0.057	0.052	0.057	0.064
N:P	0.384 **	0.367 **	0.417 **	0.117 *	0.300 **	0.160 **	0.183 **
C:P	0.236 **	0.263 **	0.282 **	0.097	0.235 **	0.157 **	0.174 **

*, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$

3 讨论

3.1 沙化草地土壤 C、N、P 化学计量特征

土壤有机 C、全 N、全 P 含量及其化学计量比是衡量土壤有机质组成、质量及营养平衡的重要指标。有研究表明,中国表层土壤有机 C、全 N 及全 P 平均含量分别为 10.32 mg/g、1.86 mg/g 及 0.78 mg/g^[13-14]。与之相比,本研究中科尔沁沙地沙化草地表层土壤具有较低的有机 C、全 N 及全 P 含量,而与古尔班通古特沙漠的研究结果较为接近^[15]。大量研究表明,草地退化过程中土壤有机 C 及养分损失是普遍现象^[8, 16]。本研究结果也表明,科尔沁沙地草地沙化过程中土壤有机 C、全 N、全 P 显著降低($P < 0.001$)。该地区强烈的风蚀作用致使土壤中黏粉粒物质的大量损失,造成土壤有机质损失,养分流失严重,而植被凋落物及根系等对土壤有机质的输入量亦渐趋匮乏,土壤有机质来源的不足也导致土壤养分的持续降低。

本研究中,土壤 C:N、N:P 及 C:P 分别为 7.50、2.22 和 16.91,远低于中国土壤(分别为 12.3、4.2 和 52.64)及全球草地(分别为 11.83、5.55 和 64.26)的研究结果^[14, 17]。同时,随着沙化程度的加剧,土壤 C:N、N:P 及 C:P 亦显著降低($P < 0.001$)。对于不同的草地生态系统,草地退化过程中元素化学计量比具有类似的变化趋势,对青藏高原高寒草甸及新疆高寒草原的研究发现,群落退化过程中土壤 C:N、N:P 及 C:P 亦表现降低趋势^[18-20]。草地退化过程中化学计量比的这种变化可能是土壤有机 C、全 N、全 P 含量积累/损失的不同步所导致的。一般来说,土壤有机 C 及 N 作为结构性成分,其在土壤中的累积和消耗存在相对固定的比值,因此 C:N 一般较为稳定^[14, 17]。而在草地沙化过程中,表现为土壤有机 C 损失速率高于全 N,产生这种有机 C 和全 N 损失速率不同步的原因可能是由于该地区强烈的风蚀作用导致土壤中轻组组分有机质及粘附有机质和养分的粘粉粒被吹蚀、搬运,而轻组组分有机质和粘粉粒的 C:N 均高于其他组分有机质及其他粒径土壤颗粒^[21-23]。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,因而在草地沙化过程中存在较大的变异性^[24-25],这可能也是造成草地沙化过程中土壤 C:P 和 N:P 下降的原因。此外,干旱半干旱地区草地生态系统主要受 N 的限制,本研究中土壤 N:P 随着草地沙化程度的加剧显著降低,指示沙漠化的发展导致系统受 N 限制的程度加剧。

科尔沁沙地沙化草地土壤有机 C、全 N、全 P 含量及其化学计量比间均具有显著相关关系,说明土壤有机 C、全 N、全 P 元素间存在着相互耦合关系。土壤有机质的形成或分解过程中需要或释放一定数量的 N、P 等营养成分及与其相应比率的 C^[26],另一方面,土壤中 N 和 P 的供应通过影响土壤中 N、P 矿化酶生产力的变化,又能影响土壤有机质的分解速率^[27]。虽然土壤有机 C、全 N、全 P 含量在草地沙化过程中损失速率不同步,但它们之间仍能保持一定的耦合关系,可能是由于元素间的这种耦合关系主要受 C、N、P 循环过程相互耦合的影响,而沙漠化的发展不仅仅是简单的物理损失,其伴随着土壤粗粒化、有机质及养分的损失、微生物活性降低等变化特征,这些变化对 C、N、P 循环过程都会产生一定程度的影响^[28-31]。并且,科尔沁沙地沙化草地土壤有机 C 和全 P 间的耦合关系不随沙漠化的发展而变化。

3.2 沙化草地土壤 C、N、P 化学计量特征与生产力间的关系

沙漠化过程中,土壤养分的大量损失,必然会限制草地生产力^[16, 32]。本研究中,科尔沁沙地草地沙化过程中,群落生产力随着全 N、全 P 含量的降低而呈减小趋势。土壤养分作为影响该地区植物生长最重要的环境因子,其含量的高低直接影响着群落生产力的变化^[33],而初级生产力是土壤有机质积累的重要来源,又反过来会影响土壤养分状况。因此,群落生产力与土壤养分间存在着一定的互馈关系^[8, 19]。

陆地生态系统中,土壤和植物 N:P 常作为衡量环境对植物生长养分限制状况的指标^[4]。Wassen 等^[34]在波兰泥炭地的施肥试验表明,N:P 小于 14 时,植物生长主要受 N 限制;N:P 大于 16 时,植物生长主要受 P 限制。草地沙化过程中土壤 N:P 的降低可以反映 N、P 元素限制程度的变化。本研究中科尔沁沙地沙化草地土壤 N:P 与生产力间具有显著的正相关关系,说明沙漠化发展过程中,相对于 P 而言,N 限制的加剧对生产力的影响更大。并且,生产力与 N:P 间的相关性高于其与全 N、全 P 元素的相关性,说明相对于土壤全 N、全

P 元素含量, N:P 更能反映土壤养分的平衡状况及其对生产力的限制作用。

3.3 沙化草地土壤 C、N、P 化学计量特征与物种多样性间的关系

土壤养分状况对群落物种多样性的影响较为复杂,关于其与多样性间关系的研究目前未表现出一致的规律性。多数人认为,在土壤养分梯度的中间位置出现高的群落物种多样性^[35-36]。但也有研究者发现,生物多样性随着土壤养分水平的提高而减小^[37]。本研究发现科尔沁沙地沙化草地物种丰富度及多样性指数与土壤全 N 含量间,以及多样性指数与土壤全 P 含量间均具有显著正相关关系($P < 0.01$),这与锡林河流域草原、高寒草甸植物群落的研究结果相一致^[19, 38]。而物种丰富度与土壤全 P 含量间无显著相关性,可能是由于该地区植物生长主要受 N 限制,而受 P 的限制作用较小^[39]。Tilman 等^[40]也指出,在土壤肥力较低时,植物群落物种丰富度的变化主要是受有限养分资源的竞争驱动的。

本研究中,科尔沁沙地沙化草地物种丰富度及多样性指数与土壤 N:P 间具有显著正相关关系,这与对生产力的研究结果相似,说明土壤 N:P 不仅可指示土壤养分状况对生产力的限制作用,还可反映养分平衡对物种多样性的影响作用。群落结构的形成与维持是物种生物学特性与环境相适应的结果^[41]。群落内部不同功能群植物对环境扰动的响应机理及程度具有差异性,李禄军等^[42]在本研究区域的研究发现,在沙质草地单独增施 N、P 肥对群落内藜科、菊科植物的优势度均无影响,而 N、P 肥配施却增加了藜科植物的优势度,降低了菊科植物在群落内的优势地位。因此,群落内不同物种对于环境养分限制的响应具有差异性,单一使用土壤 N 或 P 含量并不能很好地反映群落结构组成对沙化草地养分限制的响应,而 N:P 可更好地反映土壤养分状况对群落结构的调控作用。

4 结论

本文研究发现,科尔沁沙地沙化草地表层土壤具有较低的有机 C、全 N、全 P 含量及 C:N、N:P 和 C:P,且草地沙化过程中,有机 C、全 N、全 P 含量及 C:N、N:P 和 C:P 均显著降低;沙化草地表层土壤有机 C、全 N、全 P 元素间均呈显著正相关关系,具有一定的耦合关系,且土壤有机 C 和全 P 间的耦合关系不随沙漠化的发展而改变;草地沙化过程中,土壤养分的损失限制着草地生产力,而土壤 N:P 较全 N、全 P 含量更能反映土壤养分对生产力的限制作用;沙化草地土壤全 N 含量与物种丰富度间具有显著正相关关系,而土壤全 P 与其无显著相关性,多样性指数与全 N、全 P 含量间均具有显著正相关关系,相对于土壤全 N、全 P 含量, N:P 能更好地反映养分平衡对物种多样性的影响作用。

参考文献 (References):

- [1] Westheimer F H. Why nature chose phosphates. *Science*, 1987, 235(4793): 1173-1178.
- [2] Näsholm T, Ekblad A, Nordin A, Giesler R, Höglberg M, Höglberg P. Boreal forest plants take up organic nitrogen. *Nature*, 1998, 392(6679): 914-916.
- [3] Dormaar J F, Smoliak S, Willms W D. Distribution of nitrogen fractions in grazed and ungrazed fescue grassland Ah horizons. *Journal of Range Management*, 1990, 43(1): 6-9.
- [4] 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. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [5] 苏永中, 赵哈林, 文海燕. 退化沙质草地开垦和封育对土壤理化性状的影响. *水土保持学报*, 2002, 16(4): 5-8.
- [6] 孙小丽, 康萨如拉, 张庆, 常昌明, 马文静, 牛建明. 荒漠草原物种多样性、生产力与气候因子和土壤养分之间关系的研究. *草业学报*, 2015, 24(12): 10-19.
- [7] 石红霄, 侯向阳, 师尚礼, 吴新宏, 李鹏, 杨婷婷. 高山嵩草草甸初级生产力、多样性与土壤因子的关系. *草业学报*, 2015, 24(10): 40-47.
- [8] 左小安, 赵学勇, 赵哈林, 李玉强, 郭轶瑞, 赵玉萍. 科尔沁沙质草地群落物种多样性、生产力与土壤特性的关系. *环境科学*, 2007, 28(5): 945-951.
- [9] Li Y Q, Zhou X H, Brandle J R, Zhang T H, Chen Y P, Han J J. Temporal progress in improving carbon and nitrogen storage by grazing exclosure practice in a degraded land area of China's Horqin Sandy Grassland. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 159: 55-61.
- [10] Zhang T H, Zhao H L, Li S G, Li F R, Shirato R, Ohkuro T, Taniyama I. A comparison of different measures for stabilizing moving sand dunes in the Horqin Sandy Land of Inner Mongolia, China. *Journal of Arid Environments*, 2004, 58(2): 203-214.

- [11] 李玉强, 赵哈林, 赵学勇, 云建英, 刘新平. 沙漠化过程对植物凋落物分解的影响. 水土保持学报, 2007, 21(5): 64-67.
- [12] 朱震达, 陈广庭. 中国土地沙质荒漠化. 北京: 科学出版社, 1994: 23-26.
- [13] 王绍强, 周成虎, 李克让, 朱松丽, 黄方红. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析. 地理学报, 2000, 55(5): 533-544.
- [14] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, Melillo J M, Hall C A S. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data. Biogeochemistry, 2010, 98(1/3): 139-151.
- [15] 陶冶, 吴甘霖, 刘耀斌, 张元明. 古尔班通古特沙漠典型灌木群落土壤化学计量特征及其影响因素. 中国沙漠, 2017, 37(2): 305-314.
- [16] 李玉强, 赵哈林, 移小勇, 左小安, 陈银萍. 沙漠化过程中科尔沁沙地植物-土壤系统碳氮储量动态. 环境科学, 2006, 27(4): 635-640.
- [17] Cleveland C C, Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? Biogeochemistry, 2007, 85(3): 235-252.
- [18] 林丽, 李以康, 张法伟, 杜岩功, 郭小伟, 李婧, 刘淑丽, 曹广民. 高寒矮嵩草群落退化演替系列氮、磷生态化学计量学特征. 生态学报, 2013, 33(17): 5245-5251.
- [19] 罗亚勇, 孟庆涛, 张静辉, 赵学勇, 秦彧. 青藏高原东缘高寒草甸退化过程中植物群落物种多样性、生产力与土壤特性的关系. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1298-1305.
- [20] 阿依敏·波拉提, 安沙舟, 董乙强, 张爱宁, 杨娇. 巴音布鲁克高寒草原不同退化阶段土壤养分的变化. 新疆农业科学, 2017, 54(5): 953-960.
- [21] 赵哈林, 周瑞莲, 苏永中, 张继义, 移小勇. 我国北方半干旱地区土壤的沙漠化演变过程与机制. 水土保持学报, 2007, 21(3): 1-5.
- [22] 卢红梅, 王世杰. 喀斯特石漠化过程中的土壤物理组分有机碳氮研究. 水土保持通报, 2009, 29(5): 50-55.
- [23] Lorenz R D, Mitchell K L, Kirk R L, Hayes A G, Aharonson O, Zebker H A, Paillou P, Radebaugh J, Lumine J I, Janssen M A, Wall S D, Lopes R M, Stiles B, Ostro S, Mitri G, Stofan E R. Titan's inventory of organic surface materials. Geophysical Research Letters, 2008, 35(2): L02206.
- [24] 朱秋莲, 程曼, 安韶山, 薛志婧. 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. 水土保持学报, 2013, 27(4): 247-251.
- [25] Zhang Z S, Xue Z S, Lyu X G, Tong S Z, Jiang M. Scaling of soil carbon, nitrogen, phosphorus and C:N:P ratio patterns in peatlands of China. Chinese Geographical Science, 2017, 27(4): 507-515.
- [26] Sterner R W, Elser J J. Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2002: 225-226.
- [27] Sinsabaugh R L, Antibus R K, Linkins A E, McClaugherty C A, Rayburn L, Repert D, Weiland T. Wood decomposition: nitrogen and phosphorus dynamics in relation to extracellular enzyme activity. Ecology, 1993, 74(5): 1586-1593.
- [28] Christensen B T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates//Stewart B A, ed. Advances in Soil Science. New York: Springer, 1992: 1-90.
- [29] 苏永中, 赵哈林, 张铜会, 赵学勇. 不同退化沙地土壤碳的矿化潜力. 生态学报, 2004, 24(2): 372-378.
- [30] 王常慧, 邢雪荣, 韩兴国. 草地生态系统中土壤氮素矿化影响因素的研究进展. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2184-2188.
- [31] 展鹏飞, 肖德荣, 闫鹏飞, 刘振亚, 马金成, 陈志明, 格茸, 田伟, 王行. 藏猪扰动作用下的高寒草甸土壤退化特征及微生物群落结构变化. 环境科学, 2018, 39(4): 1840-1850.
- [32] 文海燕, 赵哈林. 退化沙质草地植被与土壤分布特征及相关分析. 干旱区研究, 2004, 21(1): 76-80.
- [33] Gross K L, Pregitzer A J, Burton A J. Spatial variation in nitrogen availability in three successional plant communities. Journal of Ecology, 1995, 83(3): 357-367.
- [34] Wassen M J, Olde Venterink H G M, De Swart E O A M. Nutrient concentrations in mire vegetation as a measure of nutrient limitation in mire ecosystems. Journal of Vegetation Science, 1995, 6(1): 5-16.
- [35] 张林静, 岳明, 顾峰雪, 张远东, 潘晓玲, 赵桂仿. 新疆阜康绿洲荒漠过渡带植物群落物种多样性与土壤环境因子的耦合关系. 应用生态学报, 2002, 13(6): 658-662.
- [36] 左小安, 赵学勇, 赵哈林, 郭轶瑞, 李玉强, 赵玉萍. 科尔沁沙地草地退化过程中的物种组成及功能多样性变化特征. 水土保持学报, 2006, 20(1): 181-185.
- [37] Bai Y F, Wu J G, Clark C M, Naeem S, Pan Q M, Huang J H, Zhang L X, Han X G. Tradeoffs and thresholds in the effects of nitrogen addition on biodiversity and ecosystem functioning: evidence from inner Mongolia Grasslands. Global Change Biology, 2010, 16(1): 358-372.
- [38] 白永飞, 陈佐忠. 锡林河流域羊草草原植物种群和功能群的长期变异性及其对群落稳定性的影响. 植物生态学报, 2000, 24(6): 641-647.
- [39] 李玉霖, 毛伟, 赵学勇, 张铜会. 北方典型荒漠及荒漠化地区植物叶片氮磷化学计量特征研究. 环境科学, 2010, 31(8): 1716-1725.
- [40] Tilman D, Kilham S S, Kilham P. Phytoplankton community ecology: the role of limiting nutrients. Annual Review of Ecology and Systematics, 1982, 13: 349-372.
- [41] 汪殿蓓, 暨淑仪, 陈飞鹏. 植物群落物种多样性研究综述. 生态学杂志, 2001, 20(4): 55-60.
- [42] 李禄军, 于占源, 曾德慧, 艾桂艳, 李晶石. 施肥对科尔沁沙质草地群落物种组成和多样性的影响. 草业学报, 2010, 19(2): 109-115.