

青藏高原高寒草原生态系统土壤氮磷比的分布特征 *

王建林¹ 钟志明^{2**} 王忠红¹ 陈宝雄² 张宪洲² 沈振西² 胡兴祥¹ 大次卓嘎¹

(¹西藏农牧学院植物科学学院, 西藏林芝 860000; ²中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要 采用野外调查和室内分析相结合的方法, 研究了青藏高原高寒草原生态系统土壤 N/P 的分布特征。结果表明: 青藏高原高寒草原生态系统土壤 N/P 总体上呈现出西高东低、斑块状交错分布的格局, N/P 的高值区主要集中在藏北高原腹地和喜马拉雅北麓湖盆区, 不同草地类型和不同自然地带土壤 N/P 差异显著。不同草地类型土壤 N/P 自上而下可分为低-高-低-高型、低-高-低型、低-高型、高-低-高型和高-低-高型等 5 个类型, 表土层与底土层 N/P 差异显著。土壤 N/P 与 0~20 cm 土壤容重、20~30 cm 土壤含水量、速效钾、全氮含量显著正相关, 与 20~30 cm 土壤容重、土壤速效磷和全磷含量显著负相关。

关键词 青藏高原 高寒草原 土壤 N/P

文章编号 1001-9332(2013)12-3399-08 **中图分类号** S154.1 **文献标识码** A

Soil N/P ratio distribution characteristics of alpine grassland ecosystem in Qinghai-Tibet Plateau. WANG Jian-lin¹, ZHONG Zhi-ming², WANG Zhong-hong¹, CHEN Bao-xiong², ZHANG Xian-zhou², SHEN Zhen-xi², HU Xing-xiang¹, Dacizhuoga¹ (¹College of Plant Science, Tibet Institute of Agriculture and Animal Husbandry, Linzhi 860000, Tibet, China; ²Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(12): 3399–3406.

Abstract: The distribution characteristics of soil N/P ratio in alpine grassland ecosystem of Qinghai-Tibet Plateau were surveyed by field investigation and laboratory analysis. Horizontally, soil N/P ratio was generally higher in west and lower in east in a manner of staggered patch distribution, with higher N/P ratios mainly centralized in the hinterland of northern part of Tibet Plateau and in the lake basin area of the northern foot of Himalayas. Significant differences in soil N/P ratio were observed among grassland types and natural transects. Vertically, the distribution of N/P ratio along the soil profile from aboveground to underground among different grass types could be categorized into five patterns, including low-high-low-high, low-high-low, low-high, high-low-high-low, and high-low-high. The N/P ratio showed a significant positive correlation with soil bulk density at 0–20 cm depth, soil water content at 20–30 cm depth, contents of soil available K and total nitrogen, respectively. However, it showed significant negative correlation with soil bulk density at 20–30 cm depth, contents of soil available P and total P, respectively.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; alpine grassland; soil; N/P ratio.

N、P 作为植物的基本营养元素, 在植物生长和各种生理调节机能中发挥着重要作用, 且彼此间关系密切^[1-2]。N/P 作为重要的生理指标, 可以反映植物生长受 N 或 P 的限制情况^[3-4]。近年来, 从元素计量(化学计量, Stoichiometry)^[5]角度分析生物地球化学元素(主要是 N/P)的区域循环规律正成为国

内外的研究热点^[6-7]。截至目前, 这一领域重点围绕着全球尺度上植物叶片中的 N、P 含量与 N/P 的化学计量学特征, 以及这些因子对植物生长的影响^[8-13]等方面进行研究。但是, 针对同一区域不同生境, 以及不同植被生活型下土壤 N/P 分布特征的报道却很少^[14-15]。

在国际生物圈(IPB)研究计划中, 青藏高原被列为全球气候变化的敏感区域。这种极端环境下发育的植被和土壤对气候变化极为敏感, 是研究生态系统对气候变化响应与适应机制的天然实验室。近

* 国家自然科学基金项目(41061008)和“十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD17B05-4)资助。

** 通讯作者. E-mail: zhongzm2008@126.com

2013-02-16 收稿, 2013-09-22 接受。

年来,一些学者对青藏高原高寒草原生态系统中的 C 和 N 进行了一些基础性研究工作^[16-20],但是尚未见到涉及整个高原面上跨不同植被带(不同自然地带)土壤 N/P 分布的研究报道。本文通过对青藏高原不同植被下土壤 N/P 的对比分析,研究青藏高原高寒草原生态系统土壤 N/P 的分布特征,旨在为进一步开展区域尺度上高原土壤关键元素化学计量学研究奠定基础。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

选择黑阿(那曲—阿里)、青藏(拉萨—青海)、新藏(拉萨—新疆)公路沿线宽 50 km、长约 4500 km 基本没有受人类活动干扰的高寒草原作为研究区域,地理坐标为 28° 23'—35° 55' N, 79° 77'—98° 12' E, 海拔 4258~5165 m。该地区属于高原温带干旱、半干旱气候类型,年均温 -4~6 °C, 年均降水量 50~500 mm; 跨越高山灌丛草甸、山地灌丛草原、山地半荒漠与荒漠、高山草原 4 个自然地带,植被涉及藏东蒿 (*Kobresia tibetica*) 草地、固沙草 (*Orinus thoroldii*) + 劲直黄芪 (*Astragalus strictus*) 草地、固沙草-藏苔草 (*Carex thibetica*) - 紫花针茅 (*Stipa purpurea*) 草地、金露梅 (*Potentilla fruticosa*) - 青藏苔草 (*Carex moorcroftii*) + 紫花针茅草地、昆仑针茅 (*Stipa roborowskyi*) - 窄叶苔草 (*Carex montis-everestii*) 草地、拉萨小檗 (*Berberis hemsleyana*) - 紫花针茅 + 白草 (*Pennisetum centrasianicum*) 草地、青藏苔草 + 紫花针茅草地、青藏苔草草地、羽柱针茅 (*Stipa subsessiliflora*) - 紫花针茅 - 禾草草地、紫花针茅 + 矮火绒草 (*Leontopodium nanum*) 草地、紫花针茅 + 藏沙蒿草 (*Kobresia tibetica*) 地型、紫花针茅 + 藏北蒿草 (*Kobresia littledalei*) 草地、紫花针茅 + 干生苔草 (*Carex aridula*) 草地、紫花针茅 + 固沙草草地、紫花针茅 + 沙生针茅 (*Stipa glareosa*) 草地、紫花针茅 + 羽柱针茅草地、紫花针茅 + 杂类草草地、紫花针茅 - 矮生嵩草 (*Kobresia humilis*) - 苔草草地和紫花针茅草地等 19 个高寒草原草地类型^[21]。

1.2 研究方法

1.2.1 野外采样 2011 年 7—8 月,选择黑阿(那曲—阿里)、青藏(拉萨—青海)、新藏(拉萨—新疆)公路沿线 51 个采样点,每个采样点重复 6 个土壤剖面,共采集土样 1224 个。采样时,采用机械取样法分别采集 0~10、10~20、20~30 和 30~40 cm 土层的土壤样品。将所采土样装袋,送回实验室风干,过

1 mm 筛后磨细,进行相关指标的测定。其中,土壤全氮采用半微量凯氏法,速效氮采用蒸馏法,土壤全磷测定采用钼锑抗比色法,速效 P 采用碳酸氢钠法,土壤全钾和速效钾测定采用原子吸收分光光度法,土壤有机质、总有机碳、总碳水化合物和活性碳采用重铬酸钾氧化-外加热法,土壤 pH 值采用电位法,水解性碳和水溶性碳用采蒽酮法,总无机碳采用双指示剂滴定法^[22] 进行测定。同时,现场调查每个采样点的植物种数、优势种、平均高度和平均盖度,并用 GPS 测定每个采样点的经、纬度,海拔仪测定海拔。此外,收集各样点相邻气象站的年均气温与年均降水量等气象资料。

1.2.2 室内分析与数据集成 在野外采样的基础上,利用公开发表的文献中有关经、纬度信息的 14 个高山草原土剖面数据^[23-29] 进行集成分析,样点的位置如图 1 所示。针对文献中部分样点有碱解氮而无全氮数据、有速效磷而无全磷数据的情况,采用多

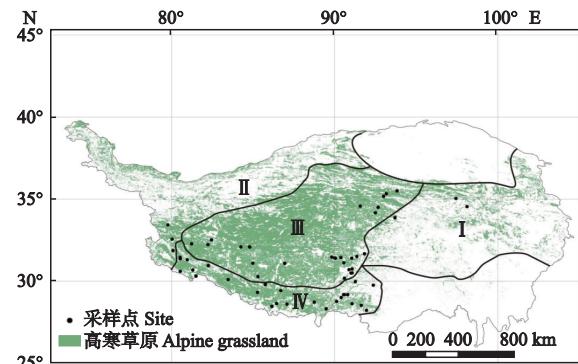


图 1 青藏高原高寒草原土壤采样点分布

Fig. 1 Distribution of soil sampling points of alpine grassland in Qinghai-Tibet Plateau.

I : 高山草原带 Alpine steppe zone; II : 高山灌丛草甸带 Alpine shrubby meadow zone; III : 山地半荒漠与荒漠带 Mountain desert and semi-desert zone; IV : 山地灌丛草原带 Mountain shrubby steppe zone. 下同 The same below.

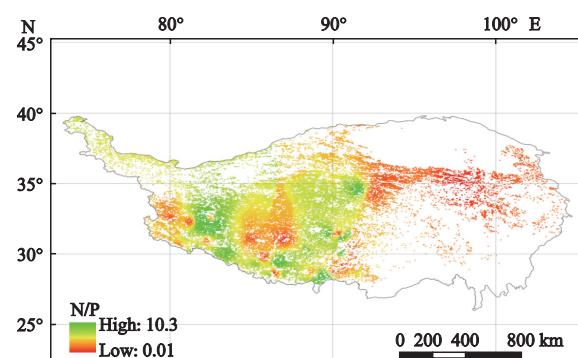


图 2 高寒草原不同草地 N/P 水平分布

Fig. 2 N/P ratio distribution of different alpine grassland types in Qinghai-Tibet Plateau.

元统计分析方法^[30],根据实测数据拟合碱解氮含量(AN, g·kg⁻¹)与全氮含量(TN, %)间的比例关系为:

$$TN = 0.2728 / [1 + \exp(1.6757 - 0.0079AN)] \\ (n=235, R=0.4553^{**}) \quad (1)$$

同时,拟合土壤速效磷含量(AP)与全磷含量(TP)间的比例关系为:

$$TP = 0.2099 / [1 + \exp(7.6105 - 3.6532AP)] \\ (n=235, R=0.4564^{**}) \quad (2)$$

式中: n 为样本数; R 为相关系数; \exp 为自然对数的底,等于2.71828.

1.3 数据处理

所有数据均采用DPS软件^[30]进行分析。采用单因素方差分析和最小显著差异法比较数据组间的差异,用逐步回归分析法建立土壤N/P与不同环境因子(地理、气候、植被、土壤物理和化学因子)间的回归方程。显著性水平设定为 $\alpha=0.05$.

2 结果与分析

2.1 高寒草原生态系统土壤N/P的水平分布

2.1.1 土壤N/P水平分布格局 由图2可以看出,青藏高原高寒草原土壤N/P的水平分布格局整体上呈现出西部高、东部低的趋势和斑块状交错分布的状况。N/P的高值区主要集中在藏北高原腹地和喜马拉雅北麓湖盆区,而低值区分布在沱沱河和通天河流域以及纳木错湖畔。

2.1.2 不同类型草地土壤N/P的水平分布 由图3可以看出,高寒草原不同类型草地之间土壤N/P差异显著,19个草地型土壤N/P的平均值为(1.59 ± 0.79),变异系数为101.1%。从紫花针茅+沙生针茅草地、固沙草-藏苔草-紫花针茅草地、紫花针茅+干生苔草草地、羽柱针茅-紫花针茅-禾草草地、昆仑针茅-窄叶苔草草地,到金露梅-青藏苔草+紫花针茅草地、紫花针茅草地、紫花针茅-矮生嵩草-藏苔草草地、紫花针茅+矮火绒草草地、紫花针茅+杂类草草地、固沙草+劲直黄芪草地、青藏苔草草地,再到紫花针茅+藏北蒿草草地、紫花针茅+藏沙蒿草地、藏东蒿草地、拉萨小檗-紫花针茅+白草草地、紫花针茅+固沙草草地、紫花针茅+羽柱针茅草地、青藏苔草+紫花针茅草地,土壤N/P逐渐下降,最大者(紫花针茅+沙生针茅草地)土壤的N/P几乎是最小者(青藏苔草+紫花针茅草地)的39倍多。

2.1.3 不同自然地带土壤N/P的水平分布 在青藏高原不同自然地带土壤N/P的水平分布也存在显

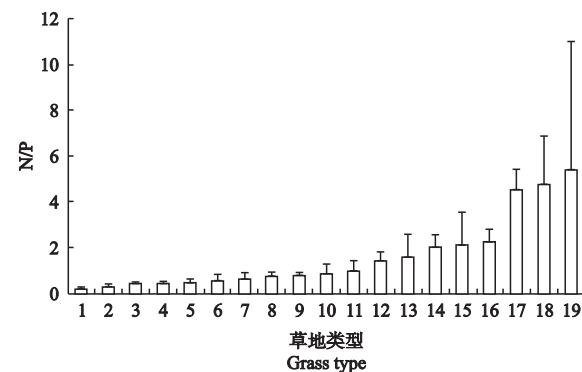


图3 高寒高原不同类型草地的土壤N/P

Fig. 3 N/P ratio of different grassland types in Qinghai-Tibet Plateau.

1)青藏苔草+紫花针茅 *Carex moorcroftii* + *Stipa purpurea*; 2)紫花针茅+羽柱针茅 *Stipa purpurea* + *Stipa subsessiliflora*; 3)紫花针茅+固沙草 *Stipa purpurea* + *Orinus thordii*; 4)拉萨小檗-紫花针茅+白草 *Berberis hemslayana*-*Stipa purpurea* + *Pennisetum centrasiacicum*; 5)藏东蒿 *Kobresia tibetica*; 6)紫花针茅+藏沙蒿草 *Stipa purpurea* + *Kobresia tibetica*; 7)紫花针茅+藏北蒿草 *Stipa purpurea* + *Kobresia littledalei*; 8)青藏苔草 *Carex moorcroftii*; 9)固沙草+劲直黄芪 *Orinus thordii* + *Astragalus strictus*; 10)紫花针茅+杂类草 *Stipa purpurea* + weeds; 11)紫花针茅+矮火绒草 *Stipa purpurea* + *Leontopodium nanum*; 12)紫花针茅-矮生嵩草-藏苔草 *Stipa purpurea* + *Kobresia humilis* + *Carex thibetica*; 13)紫花针茅 *Stipa purpurea*; 14)金露梅-青藏苔草+紫花针茅 *Potentilla fruticosa*-*Carex moorcroftii* + *Stipa purpurea*; 15)昆仑针茅-窄叶苔草 *Stipa roborowskyi*-*Carex montis-everestii*; 16)羽柱针茅-紫花针茅-禾草 *Stipa subsessiliflora*-*Stipa purpurea* + gramineous forage; 17)紫花针茅+干生苔草 *Stipa purpurea* + *Carex aridula*; 18)固沙草-藏苔草-紫花针茅 *Orinus thordii*-*Carex thibetica*-*Stipa purpurea*; 19)紫花针茅+沙生针茅 *Stipa purpurea* + *Stipa glareosa*.

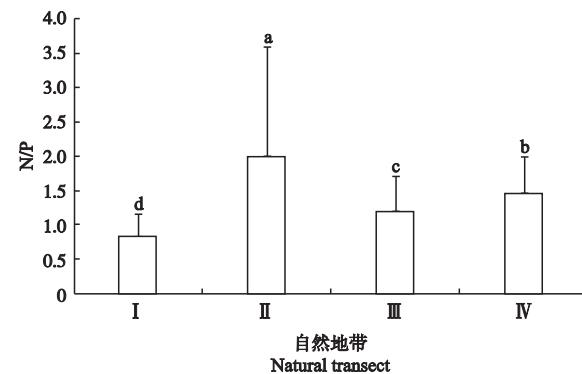


图4 青藏高原不同自然地带土壤的N/P

Fig. 4 N/P ratio of different natural transects in Qinghai-Tibet Plateau.

著差异(图4)。其中,高山草原带土壤N/P为(1.98 ± 1.59),而高山灌丛草甸带、山地灌丛草原带和山地半荒漠与荒漠带的N/P平均值为(1.16 ± 0.46),显著低于高山草原带,且彼此之间差异显著。

2.2 高寒草原生态系统土壤N/P的垂直分布

2.2.1 不同类型草地土壤N/P的垂直分布 由表1可以看出,土壤剖面自上而下,可将19个高寒草原草地型土壤N/P的变化划分为5种类型:

表 1 不同类型草地 0~40 cm 土层的土壤 N/P

Table 1 Soil N/P ratio among soil layers from 0 cm to 40 cm of different grassland types

垂直分布类型 Vertical distribution type	草地类型 Grassland type	剖面数量 Profile samples	土壤 N/P Soil N/P ratio			
			0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	30~40 cm
低-高-低-高 Low-high-low-high	昆仑针茅-窄叶苔草 ¹⁾ 青藏苔草+紫花针茅 ²⁾	6 36	1.08±0.08c 0.49±0.85c	4.19±0.29a 0.69±0.86b	1.22±0.09c 0.67±0.62b	2.10±0.15b 1.04±1.09a
低-高-低 Low-high-low	紫花针茅+沙生针茅 ³⁾	12	1.39±1.21d	13.48±18.65a	2.22±2.94c	4.46±5.28b
	藏东蒿 ⁴⁾	30	0.47±0.23b	0.50±0.27a	0.46±0.19b	0.45±0.18b
低-高 Low-high 高-低-高-低 High-low-high-low	固沙草-藏苔草-紫花针茅 ⁵⁾	12	5.93±1.99a	6.34±3.19a	4.87±0.16b	1.92±0.43c
	羽柱针茅-紫花针茅-禾草 ⁶⁾	6	2.51±0.18a	2.87±0.20a	1.92±0.14b	1.77±0.13b
	紫花针茅+藏北蒿草 ⁷⁾	12	0.57±0.35c	0.69±0.32b	0.75±0.24a	0.54±0.25c
	紫花针茅+干生苔草 ⁸⁾	6	3.80±0.27c	5.82±0.41a	4.70±0.33b	3.71±0.26c
	紫花针茅+固沙草 ⁹⁾	6	0.40±0.03a	0.46±0.03a	0.32±0.02b	0.19±0.01c
	金露梅-青藏苔草+紫花针茅 ¹⁰⁾	6	1.29±0.09c	2.00±0.14b	2.29±0.16a	2.54±0.18a
	紫花针茅+羽柱针茅 ¹¹⁾	6	0.39±0.03a	0.14±0.01c	0.25±0.02b	0.21±0.02b
高-低-高 High-low-high	紫花针茅+矮火绒草 ¹²⁾	12	0.85±0.98b	0.74±0.84b	0.77±0.26b	1.60±1.43a
	固沙草+劲直黄芪 ¹³⁾	12	0.89±1.01a	0.80±0.76a	0.52±0.63c	0.65±0.65b
	拉萨小檗-紫花针茅+白草 ¹⁴⁾	6	0.51±0.04a	0.24±0.02c	0.35±0.02b	0.46±0.03a
	青藏苔草 ¹⁵⁾	12	0.87±0.48a	0.45±0.28c	0.76±0.71b	0.79±0.78b
	紫花针茅+藏沙蒿草 ¹⁶⁾	12	0.77±0.22a	0.58±0.02b	0.27±0.14c	0.57±0.75b
	紫花针茅-矮生嵩草-苔草 ¹⁷⁾	12	1.38±1.65b	1.31±1.63b	1.21±1.50b	1.94±2.49a
	紫花针茅 ¹⁸⁾	84	2.03±1.63a	1.22±1.13b	1.04±0.91b	2.04±1.98a
紫花针茅+杂类草 ¹⁹⁾	紫花针茅+杂类草 ¹⁹⁾	18	3.19±3.77a	0.97±0.54c	1.05±1.03bc	1.15±1.40b

不同字母分别表示差异显著($P<0.05$)。Different letters meant significant difference at 0.05 level. 下同 The same below. 1) *Stipa roborowskyi-Carex montis-everestii*; 2) *Carex moorcroftii + Stipa purpurea*; 3) *Stipa purpurea + Stipa glareosa*; 4) *Kobresia tibetica*; 5) *Orinus thoroldii-Carex thibetica-Stipa purpurea*; 6) *Stipa subsessiliflora-Stipa purpurea+gramineous forage*; 7) *Stipa purpurea + Kobresia littledalei*; 8) *Stipa purpurea + Carex aridula*; 9) *Stipa purpurea + Orinus thoroldii*; 10) *Potentilla fruticosa-Carex moorcroftii+Stipa purpurea*; 11) *Stipa purpurea + Stipa subsessiliflora*; 12) *Stipa purpurea + Leontopodium nanum*; 13) *Orinus thoroldii + Astragalus strictus*; 14) *Berberis hemslayana-Stipa purpurea + Pennisetum centrasianicum*; 15) *Carex moorcroftii*; 16) *Stipa purpurea + Kobresia tibetica*; 17) *Stipa purpurea-Kobresia humilis + Carex thibetica*; 18) *Stipa purpurea*; 19) *Stipa purpurea + weeds*.

1) 低-高-低型: 包括藏东蒿草地、固沙草-藏苔草-紫花针茅草地、羽柱针茅-紫花针茅-禾草草地、紫花针茅+藏北蒿草草地、紫花针茅+干生苔草草地、紫花针茅+固沙草草地等 6 个草地类型。其特点是: 随着土层深度的增加, 0~20 cm 土壤 N/P 逐渐增加; 20~40 cm 土壤 N/P 逐渐减小。其中, 10~20 和 30~40 cm 土层间 N/P 差异显著。

2) 低-高型: 为金露梅-青藏苔草+紫花针茅草地。其特点是: 随着土层深度的增加, 土壤 N/P 逐渐增加。其中, 0~10 和 30~40 cm 土层间土壤 N/P 差异显著。

3) 高-低-高-低型: 为紫花针茅+羽柱针茅草地。其特点是: 随着土层深度的增加, 0~20 cm 的土壤 N/P 逐渐减小; 20~30 cm 土壤 N/P 逐渐增大; 30~40 cm 土壤 N/P 逐渐减小。其中, 0~10 和 30~40 cm 土层间的 N/P 差异显著。

4) 高-低-高型: 包括固沙草+劲直黄芪草地、拉萨小檗-紫花针茅+白草草地、青藏苔草草地、紫花针茅+藏沙蒿草地、紫花针茅-矮生嵩草-藏苔草草地、紫花针茅草地、紫花针茅+杂类草草地等 7 个草地

类型。其特点是: 随着土层深度的增加, 0~20 cm 土壤 N/P 逐渐减小, 20~40 cm 的土壤 N/P 逐渐增大。其中, 10~20 和 30~40 cm 土层间 N/P 差异显著(紫花针茅+藏沙蒿草地除外)。

5) 低-高-低-高型: 包括昆仑针茅-窄叶苔草草地、青藏苔草+紫花针茅草地、紫花针茅+沙生针茅草地等 3 个草地。其特点是: 随着土层深度的增加, 0~20 cm 土壤 N/P 逐渐增大; 20~30 cm 土壤 N/P 逐渐减小; 30~40 cm 土壤 N/P 又逐渐增大。其中, 10~20 和 30~40 cm 土层间 N/P 差异显著。

2.2.2 不同自然地带土壤 N/P 垂直分布

由表 2 可以看出, 土壤剖面自上而下, 不同自然植被带土壤 N/P 的分布特征差异明显。

山地半荒漠与荒漠植被带中, 随着土层深度的增加, 土壤 N/P 逐渐减小, 各土层间达到显著性差异水平(10~20 cm、20~30 cm 土层除外)。0~10 cm 土层的 N/P 在 0.95 以上, 而 10~20、20~30 和 30~40 cm 土层的 N/P 均在 0.89 以下, 分别相当于 0~10 cm 土层 N/P 的 92.3%、97.5% 和 67.5%。

山地灌丛草原植被带中, 在 0~20 cm 范围内, 随

表2 不同自然地带各土层间的土壤N/P

Table 2 Soil N/P ratio among soil layers from 0 cm to 40 cm of different natural transects

自然地带 Natural transect	剖面数量 Profile samples	土壤 N/P Soil N/P ratio			
		0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	30~40 cm
I	90	1.85±1.20b	2.57±0.67a	1.03±0.95c	2.49±3.33a
II	42	0.91±0.84c	1.27±1.04b	1.21±0.64b	1.36±0.48a
III	66	0.96±0.72a	0.88±0.69b	0.83±0.84b	0.65±0.52c
IV	108	1.52±1.85b	1.81±2.14a	1.32±1.48c	1.15±1.03d

I:高山草原带 Alpine steppe zone; II:高山灌丛草甸带 Alpine shrubby meadow zone; III:山地半荒漠与荒漠带 Mountain desert and semi-desert zone; IV:山地灌丛草原带 Mountain shrubby steppe zone.

随着土层深度的增加,土壤N/P逐渐增大;在20~40 cm范围内,随着土层深度的增加,N/P逐渐减小。不同土层间N/P差异显著。

高山草原植被带和高山灌丛草甸植被带中,随着土层深度的增加,0~20 cm土壤N/P逐渐增加;20~30 cm N/P逐渐减小;30~40 cm N/P又逐渐增加。0~10 和 20~30 cm 土层间 N/P 差异显著。

2.3 高寒草原土壤N/P与环境因子的关系

2.3.1 土壤N/P与地理因子的关系 土壤N/P与地理因子的关系方程:

$$y = -16.1198 + 0.2096x_1 + 0.1149x_2 + 0.0003x_3 \\ (n=54, R=0.327, R_1=0.124, R_2=0.211, \\ R_3=-0.070) \quad (3)$$

由式(3)可以看出,土壤N/P(y)与纬度(x_1)和经度(x_2)呈正相关,而与海拔(x_3)呈负相关关系。表明地理因子对高寒草原生态系统土壤N/P的影响整体不显著。

2.3.2 土壤N/P与气候因子的关系 土壤N/P与气候因子的关系方程:

$$y = 5.0162 + 0.0030x_6 - 0.0036x_7 - 0.1112x_{11} \\ (n=54, R=0.448^*, R_6=0.245, R_7= \\ -0.268, R_{11}=-0.365) \quad (4)$$

由式(4)可以看出,影响土壤N/P的主要气候因子是 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温(x_6)、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温(x_7)和年均相对湿度(x_{11}),而年均日照时数(x_1)、年均气温(x_2)、最冷月均气温(x_3)、最暖月均气温(x_4)、 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温(x_5)、年均降水量(x_8)、6—9月降水量(x_9)和年均蒸发量(x_{10})的影响则很小。表明 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温和年均相对湿度是影响高寒草原生态系统土壤N/P的主要气候因子。气候因子对土壤N/P的影响显著。

2.3.3 土壤N/P植被因子的关系 土壤N/P与植被因子的关系方程:

$$y = 0.1763 + 0.0015x_1 + 0.0007x_2 + 0.0066x_4 +$$

$$0.0370x_6 + 0.0082x_7 \\ (n=54, R=0.318, R_1=0.078, R_2=-0.030, \\ R_4=0.096, R_6=0.238, R_7=0.055) \quad (5)$$

由式(5)可以看出,影响土壤N/P的主要植被因子是0~10 cm地下生物量(x_1)、10~20 cm地下生物量(x_2)、30~40 cm地下生物量(x_4)、植被盖度(x_6)、植被高度(x_7),而20~30 cm地下生物量(x_3)、地上生物量(x_5)对土壤N/P无明显影响。植被因子对土壤N/P的影响未达到显著水平。

2.3.4 土壤N/P与土壤物理因子的关系 土壤N/P与土壤物理因子的关系方程:

$$y = -1.5087 - 3.858x_1 + 13.8317x_3 - 8.6021x_4 - \\ 0.1888x_5 + 0.1814x_6 + 0.1398x_7 \\ (n=54, R=0.470^*, R_1=-0.240, R_3= \\ 0.373^{**}, R_4=-0.267, R_5=-0.321^*, \\ R_6=0.289^*, R_7=0.231) \quad (6)$$

由式(6)可以看出,影响土壤N/P的主要土壤物理因子是:0~10 cm土壤容重(x_1)、20~30 cm土壤容重(x_3)、30~40 cm土壤容重(x_4)、0~10 cm土壤含水量(x_5)、10~20 cm土壤含水量(x_6)、20~30 cm土壤含水量(x_7),而10~20 cm土壤容重(x_2)和30~40 cm土壤含水量(x_8)则对土壤N/P无明显影响。同时,土壤N/P与20~30 cm土壤容重、0~10 cm土壤含水量、10~20 cm土壤含水量的偏相关系数均达到显著水平,但与0~10 cm土壤含水量的偏相关系数未达到显著水平。土壤物理因子对土壤N/P的影响显著。

2.3.5 土壤N/P与土壤化学因子的关系 土壤N/P与土壤化学因子的数学模型:

$$y = 5.9970 - 0.5400x_1 - 0.0403x_3 + 0.0050x_4 + \\ 7.9437x_5 - 11.4130x_6 - 3794.7806x_{10} + \\ 3788.4629x_{11} + 3834.7821x_{12} + 26.1742x_{14} \\ (n=54, R=0.787^{**}, R_1=-0.212, R_3= \\ -0.353^*, R_4=0.314^*, R_5=0.355^*, R_6= \\ -0.505^{**}, R_{10}=-0.1514, R_{11}=0.1512, \\ R_{12}=0.1526, R_{14}=0.2184) \quad (7)$$

由式(7)可以看出,影响土壤N/P的主要土壤化学因子是:土壤pH(x_1)、速效磷(x_3)、速效钾(x_4)、全氮(x_5)、全磷(x_6)、总碳水化合物(x_{10})、水解性碳(x_{11})、水溶性碳(x_{12})和胡富总碳(x_{14}),而土壤速效氮(x_2)、全钾(x_7)、有机质(x_8)、总有机碳(x_9)、活性碳(x_{13})和 HCO_3^- (x_{15})对土壤N/P无明显影响。同时,土壤N/P与土壤速效磷、速效钾、全

氮、全磷的偏相关系数均达到显著水平,而与土壤 $pH(x_1)$ 、总碳水化合物(x_{10})、水解性碳(x_{11})、水溶性碳(x_{12})和胡富总碳(x_{14})的偏相关系数未达到显著水平。土壤化学因子对土壤 N/P 的影响显著。

3 讨 论

3.1 青藏高原高寒草原生态系统土壤 N/P 的分布特征

本研究表明,在水平方向上,青藏高原高寒草原生态系统土壤 N/P 呈现出西部高、东部低的总体趋势和斑块状交错分布的格局,N/P 的高值区主要集中在藏北高原腹地和喜马拉雅北麓湖盆区,不同草地和不同自然地带之间土壤 N/P 差异显著;依土壤剖面自上而下,不同类型草地的土壤 N/P 可分为低-高-低-高型、低-高-低型、由低到高型、高-低-高-低型、高-低-高型 5 个类型,表土层与底土层土壤 N/P 差异显著。这与青藏高原放牧高寒草甸土壤 N/P 由高到低^[31]、东祁连山高寒嵩草草地土壤 N/P 高-低-高^[32]的研究结果一致。但是,青藏高原高寒草原生态系统土壤剖面自上而下 N/P 的分布类型较这些土壤更为丰富。造成这一现象的原因可能与青藏高原独特的地质结构和大气环流条件下所形成的植被类型有关,也可能与环境因素影响高寒草原土壤中有机质积累以及微生物的活性有关。

3.2 环境因素对青藏高原高寒草原生态系统土壤 N/P 的影响

本研究表明,土壤 N/P 与土壤 0~20 cm 土壤容重、20~30 cm 土壤含水量、速效钾、全氮含量呈显著正相关,与 20~30cm 土壤容重、土壤速效磷、全磷含量呈显著负相关。同时,土壤 N/P 与经纬度呈正相关,而与海拔呈负相关。这与以往的一些研究结果相近,如:中国陆地植被叶 N/P 随着纬度增加而增加^[6]、北京及周边地区植物 N/P 与海拔呈负相关关系^[33]、巴西热带雨林植物 N/P 与降水量无关^[34]、中国温带针阔混交林、热带季雨林、亚热带常绿阔叶林植物叶片 N/P 与降水的线性关系不显著^[35]、黄土高原植物叶片 N/P 随纬度升高而增加^[36]、青藏高原草地植物叶片的 N/P 与土壤 P 含量呈显著负相关^[3];但与另外一些研究结果相佐,如:呼伦贝尔草地土壤 N/P 与经度呈显著负相关^[37]、北京及周边地区植物 N/P 与气候因子(年均温度/降水量/日照时数)呈显著正相关^[33]、全球植被叶片 N/P 随纬度减小而显著增加^[36,38]。其原因可能与青藏高原所处的独特的地理位置有关,也可能

与青藏高原独特的地理和气候条件下发育的植物及土壤类型有关。

3.3 不同地区土壤 N/P 的比较

由表 3 可以看出,青藏高原高寒草原生态系统 19 个草地型土壤 N/P 的平均值和 4 个自然地带 N/P 的平均值高于苏北潮滩湿地、内蒙古荒漠草原、黄土高原天然长芒草地和青海封育芨芨草原,但低于东北农田、黑龙江省草甸草原、闽江河口湿地、温带针阔混交林、热带季雨林、亚热带常绿阔叶林、甘南亚高山草甸、东祁连山高寒嵩草草地。这表明高寒草原土壤带 N/P 的平均值在我国各类生态系统中均处于较低水平,而且青藏高原高寒草原生态系统土壤磷在我国各类生态系统中处于较低水平(另文报道),但是磷的有效性较高。在青藏高原寒冷的气候条件下,土壤微生物的繁殖速度受到限制,但是微生物在矿化土壤有机质中释放磷的潜力却较大。这

表 3 青藏高原高寒草原生态系统和其他地区的土壤 N/P 比较

Table 3 Soil N/P ratio of alpine grassland ecosystem in Qinghai-Tibet Plateau and natural transects in other areas

生态系统类型 Ecosystem type	土壤 N/P Soil N/P ratio	文献来源 Reference
东北农田 Farmland in Northeast China	7.92	[38]
黑龙江省草甸草原 Alpine meadow grassland in Heilongjiang Province	4.84	[39]
闽江河口湿地 Wetland at Minjiang River estuary	4.42	[40]
苏北潮滩湿地 Tidal wetland in north Jiangsu Province	0.92	[41]
内蒙古荒漠草原 Desert grassland in Inner Mongolia	0.13	[42]
温带针阔混交林 Temperate coniferous broad-leaved mixed forest	8.36	[35]
热带季雨林 Tropical seasonal rainforest	5.65	[35]
亚热带常绿阔叶林 Subtropical evergreen broad-leaved forest	8.62	[35]
甘南亚高山草甸 Subalpine meadow in south Gansu Province	7.73	[43]
青海封育芨芨草原 <i>Achnatherus splendens</i> grassland under enclosure in Qinhai Province	0.10	[44]
东祁连山高寒嵩草草地 Alpine <i>Kobresia graminifolia</i> grassland in east Qilian Mountains	4.58	[32]
黄土高原天然长芒草地 Natural grassland with long awns in Loess Plateau	1.32	[45]
青藏高原高寒草原 19 个草地型 19 grassland types of alpine grassland in Qinghai-Tibet Plateau	1.59	本研究 This study
青藏高原高寒草原 4 个自然地带 4 natural transects of alpine grassland in Qinghai-Tibet Plateau	1.36	本研究 This study

对青藏高原高寒草原土壤N、P含量及其利用效率的研究具有积极的意义。

致谢 中国科学院植物研究所郭柯研究员提供青海剖面数据,谨致谢意。

参考文献

- [1] Marschner H. Mineral Nutrition of Higher Plants. New York: Academic Press, 1995
- [2] Aerts R, Chapin FS. The mineral nutrition of wild plants revisited: A re-evaluation of processes and patterns. *Advances in Ecological Research*, 2000, **30**: 1–67
- [3] Koerselman W, Meuleman AFM. The vegetation N/P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation. *Journal of Applied Ecology*, 1996, **33**: 1441–1450
- [4] Vitousek PM, Howarth RW. Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur? *Biogeochemistry*, 1991, **13**: 87–115
- [5] Elser JJ, Bracken MES, Cleland EE, et al. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 2007, **10**: 1135–1142
- [6] Wang X-Q (王绍强), Yu G-R (于贵瑞). Ecological stoichiometry characteristics of C:N:P in ecosystem. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(8): 3937–3947 (in Chinese)
- [7] Reich PB, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, **101**: 11001–11006
- [8] Zhang L-X (张丽霞), Bai Y-F (白永飞), Han X-G (韩兴国). Application of N:P stoichiometry to ecology studies. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 2003, **45**(9): 1009–1018 (in Chinese)
- [9] Wardle DA, Walker LR, Bardgett RD. Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences. *Science*, 2004, **305**: 509–513
- [10] He JS, Fang JY, Wang ZH, et al. Stoichiometry and large scale patterns of leaf carbon and nitrogen in the grassland biomes of China. *Oecologia*, 2006, **149**: 115–122
- [11] He JS, Wang L, Flynn DFB, et al. Leaf nitrogen/phosphorus stoichiometry across Chinese grassland biomes. *Oecologia*, 2008, **155**: 301–310
- [12] Thompson K, Parkinson JA, Band SR, et al. Comparative study of leaf nutrient concentrations in a regional herbaceous flora. *New Phytologist*, 1997, **136**: 679–689
- [13] Braakhekke WG, Hooftman DAP. The resource balance hypothesis of plant species diversity in grassland. *Journal of Vegetation Science*, 1999, **10**: 187–200
- [14] Yin X-R (银晓瑞), Liang C-R (梁存柱), Wang L-X (王立新). Plant nutrition stoichiometry of different recovery succession of typical grassland in Inner Mongolia. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2010, **34**(1): 39–47 (in Chinese)
- [15] Xu L-L (徐玲玲), Zhang X-Z (张宪洲), Shi P-L (石培礼), et al. CO₂ exchange characteristics of alpine meadow eco-system in Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2005, **25**(8): 1948–1952 (in Chinese)
- [16] Zhang X-Z (张宪洲), Shi P-L (石培礼), Liu Y-F (刘允芬), et al. Soil CO₂ emission and carbon balance of alpine grassland eco-system in Qinghai-Tibet Plateau. *Science in China Series D: Earth Sciences* (中国科学D辑·地球科学), 2004, **34**(suppl. II): 193–199 (in Chinese)
- [17] Wang C-T (王长庭), Long R-J (龙瑞军), Cao G-M (曹广民), et al. Soil content of N and P variation characteristics of the main grassland types along the altitudes and its influence factors in Three-River-Source area. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2006, **30**(3): 441–449 (in Chinese)
- [18] Bai J-B (白洁冰), Xu X-L (徐兴良), Song M-H (宋明华), et al. Effects of temperature and nitrogen input on soil carbon mineralization of three kinds alpine grassland in Qinghai-Tibet Plateau. *Ecology and Environmental Sciences* (生态环境学报), 2011, **20**(5): 855–859 (in Chinese)
- [19] Li M-C (李明财), Liu H-Y (刘洪艳), Song D-W (宋大伟), et al. Water use efficiency and nitrogen use efficiency of alpine plants grown in the east of Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, **27**(6): 1216–1224 (in Chinese)
- [20] Wang J-L (王建林), Ouyang H (欧阳华), Wang Z-H (王忠红), et al. Influential factors and distribution characteristics of topsoil organic carbon of alpine grassland ecosystem in the south slope of Gongga South Mountain-Laguigangri Mountain. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(7): 3501–3508 (in Chinese)
- [21] Land Administration Bureau in Tibet Autonomous Region (西藏自治区土地管理局). *Grassland Resources in Tibet*. Beijing: Science Press, 2001 (in Chinese)
- [22] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences (中国科学院南京土壤研究所). *Physical and Chemical Analysis of Soil*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978 (in Chinese)
- [23] Agricultural Regionalization Office of Qinghai Province (青海农业区划办公室). *Soil Resources in Qinghai Province*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1997 (in Chinese)
- [24] Liang X-Y (梁显有). *Soil Resources of Shannan Prefecture in Tibet*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1991 (in Chinese)
- [25] Yan Y-L (阎银良). *Soil Resources of Naqu Prefecture in Tibet*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1991 (in Chinese)
- [26] Zhang B (张斌), Li S-H (李盛湖), Xiao D-Z (肖笃志). *Soil Resources of Ngari Prefecture in Tibet*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1991 (in Chinese)
- [27] Wang H-Q (王浩清), Wang J-X (王敬轩). *Soil Re-*

- sources of Lhasa Prefecture in Tibet. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1993 (in Chinese)
- [28] Zhang T-Z (张天增), Yao Z-F (姚祖芳). Soil Resources of Nagqu Prefecture in Tibet. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1992 (in Chinese)
- [29] Hu J-Y (胡建莹), Guo K (郭柯), Dong M (董鸣). Relationship between leaf structure change and ecological factors of dominant species of alpine grassland. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2008, **32**(2): 370–376 (in Chinese)
- [30] Tang M-Y (唐明义), Feng M-G (冯光明). Data Processing System (DPS) Software. Beijing: Science Press, 2000 (in Chinese)
- [31] Zhang F-W (张法伟), Li Y-N (李英年), Wang S-P (汪诗平), et al. Response of soil organic matter, total nitrogen and total phosphorus to different land use patterns in alpine meadow of Qinghai-Tibet Plateau. *Chinese Journal of Agrometeorology* (中国农业气象), 2009, **30**(3): 323–326 (in Chinese)
- [32] Yang C-D (杨成德), Long R-J (龙瑞军), Chen X-R (陈秀蓉), et al. Characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus density in top soil under different alpine grasslands on the eastern Qilian Mountains. *Chinese Journal of Grassland* (中国草地学报), 2008, **30**(1): 1–5 (in Chinese)
- [33] Han W-X (韩文轩), Wu Y (吴漪), Tang L-Y (汤璐瑛), et al. Leaf carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry across plant species in Beijing and its periphery. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (北京大学学报), 2009, **45**(5): 855–860 (in Chinese)
- [34] Liu C (刘超), Wang Y (王洋), Wang N (王楠), et al. Advances research in plant nitrogen, phosphorus and their stoichiometry in terrestrial ecosystems: A review. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2012, **36**(11): 1205–1216 (in Chinese)
- [35] Wang J-Y (王晶苑), Wang S-Q (王绍强), Li R-L (李幼兰), et al. C:N:P stoichiometric characteristics of four forest types' dominant tree species in China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2011, **35**(6): 587–595 (in Chinese)
- [36] Yang H-M (杨惠敏), Wang D-M (王冬梅). Advances in the study on ecological stoichiometry in grass-environment system and its response to environmental factors. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 2011, **20**(2): 244–252 (in Chinese)
- [37] Ding X-H (丁小慧), Luo S-Z (罗淑政), Liu J-W (刘金巍), et al. Longitude gradient changes on plant community and soil stoichiometry characteristics of grassland in Hulunbeir. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2012, **32**(11): 3467–3476 (in Chinese)
- [38] Zhang X-Y (张兴义), Sui Y-Y (隋跃宇), Zhang S-L (张少良), et al. Spatial heterogeneities of total carbon, nitrogen, phosphorus and potassium content in black thin-layer soil. *Bulletin of Soil and Water Conservation* (水土保持通报), 2008, **28**(2): 1–6 (in Chinese)
- [39] Dai J-J (戴建军), Shi F-Q (石发庆), Zhang H-J (张海军), et al. Soil P condition and regulation in west of Heilongjiang Province. *Grassland of China* (中国草地), 2001, **23**(3): 45–48 (in Chinese)
- [40] Wang W-Q (王维奇), Tong C (全川), Jia R-X (贾瑞霞), et al. Ecological stoichiometry characteristics of wetland soil carbon, nitrogen and phosphorus in different water-flooded frequency. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2010, **24**(3): 238–242 (in Chinese)
- [41] Gao J-H (高建华), Bai F-L (白凤龙), Yang G-S (杨桂山), et al. C, N and P distribution characteristics of tidal wetland in different ecological zone in north Jiangsu Province. *Quaternary Sciences* (第四纪研究), 2007, **27**(5): 756–765 (in Chinese)
- [42] Geng Y (耿燕), Wu Y (吴漪), He J-S (贺金生). Relationship between leaf P content and soil available P of grassland in Inner Mongolia. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2011, **35**(1): 1–8 (in Chinese)
- [43] Liu H-X (刘昊霞), Wang G (王刚). N and P stoichiometry of plant and soil on slope direction gradient of sub-alpine meadows. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)* (兰州大学学报·自然科学版), 2012, **48**(3): 70–75 (in Chinese)
- [44] Li Y-J (李亚娟), Cao G-M (曹广民), Long R-J (龙瑞军). Effects of different grassland utilization types on soil content of organic carbon, total N and total P. *Grassland and Turf* (草原与草坪), 2012, **32**(5): 26–35 (in Chinese)
- [45] An Z (安卓), Niu D-C (牛得草), Wen H-Y (文海燕), et al. Effects of N addition on nutrient resorption efficiency and C:N:P stoichiometric characteristics in *Stipa bungeana* of steppe grasslands in the Loess Plateau, China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2011, **35**(8): 801–807 (in Chinese)

作者简介 王建林,男,1969年生,教授。主要从事高原生态环境与生物多样性研究。E-mail: xzwangjl@126.com

责任编辑 李凤琴