

DOI: 10.11766/trxb201608170269

# 典型自然带土壤氮磷化学计量空间分异特征及其驱动因素研究\*

卢同平<sup>1, 2</sup> 张文翔<sup>1, 2†</sup> 牛洁<sup>1, 2</sup> 林永静<sup>1, 2</sup> 武梦娟<sup>1, 2</sup>

(1 云南师范大学高原湖泊生态与全球变化实验室, 昆明 650500)

(2 云南省高原地理过程与环境变化重点实验室, 昆明 650098)

**摘要** 植物生活型、地形及区域气候特征等对土壤养分的空间分布有着重要的影响。通过对我国典型自然带土壤氮磷化学计量与植物生活型、地形及气候因素间相互关系的研究, 探讨了我国土壤氮磷的空间变异与分布特征及其主要控制因素。结果发现, 5个自然带的土壤全氮(TN)和氮磷比(N/P)存在显著差异( $p < 0.01$ ); 除温带荒漠带较低( $0.47 \text{ mg g}^{-1}$ )外, 土壤全磷(TP)均值总体变化不明显( $p > 0.05$ )。在不同自然带区域内, TN、TP及N/P变化与海拔、温度及降水呈现出显著的线性和非线性二次相关, 即表现出线性与单峰模式。暖温带落叶阔叶林带、温带草原带、温带荒漠带森林土壤中TN, 以及青藏高原高寒植被带草本土壤中TP、温带荒漠带森林土壤的N/P主要受海拔因素的影响, 而温带草原带草本植物的土壤TP则主要受降水的影响。同时, 研究还发现, 在多要素共同作用时, 其影响程度也略有差异, 温度和海拔作为控制因素影响亚热带常绿阔叶林带森林和温带草原带草本土壤TN变化, 但前者受温度控制更为明显, 后者则以海拔为主要驱动因素, 而温带荒漠带草本土壤和森林土壤的TN主要受海拔和降水作用的影响, 但以降水影响为主; 亚热带常绿阔叶林带森林土壤TP, 温带草原带、温带荒漠带和青藏高原高寒植被带草本土壤的N/P受植物生活型、地形及气候的共同影响, 但程度略有不同, 其中TP表现为降水 > 温度 > 海拔, 而N/P为温度 > 海拔 > 降水。因此, 在自然带和植物生活型的主控背景下, 海拔、温度和降水的主控或交互作用直接驱动土壤氮磷及其化学计量特征的空间分异。

**关键词** 自然带; 植物生活型; 海拔梯度; 气候因子; 主控因素

**中图分类号** P9351.1; P595; Q148 **文献标识码** A

土壤养分直接决定地上有机体生长、植被群落结构、生产力水平和生态系统的稳定性<sup>[1-3]</sup>, 其中元素氮(N)、磷(P)是植物生长发育所必需的矿质元素和主要限制性元素, 二者既相互独立又互相影响。N、P元素的化学计量特征不仅对生态系统养分元素的循环模式产生直接影响, 而且会影响生态系统碳的循环和蓄积<sup>[4]</sup>。在大尺度上, 植物N、P元素含量的差异性植物对温度、降水、

土壤、生物群落以及人类活动等生物和非生物因子长期适应的结果<sup>[5]</sup>, 反映了植物养分元素分布的地理格局和生物地球化学循环的区域特征<sup>[6]</sup>。因此, 土壤生态化学计量可作为反映土壤内部养分循环和对植物养分供应状况的指标, 以研究生态过程对全球气候变化的响应<sup>[7]</sup>。从较大尺度上研究土壤N、P及其化学计量的空间变异特征, 将为进行全球变化背景下土壤—植被区域响应研究提供一定

\* 国家自然科学基金项目(41461015)、云南省中青年学术技术带头人后备人才项目(2015HB029)和云南省水利厅项目(2014003)联合资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41461015), the Reserve Talents of Young and Middle-aged Academic Technology Leaders of Yunnan Province of China (No. 2015HB029), the Department of Water Resources of Yunnan Province of China (No. 2014003)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wenxiangzhang@gmail.com

作者简介: 卢同平(1988—), 男, 甘肃定西人, 硕士研究生, 研究方向: 环境地球化学。E-mail: tongpinglu2014@sina.com

收稿日期: 2016-08-17; 收到修改稿日期: 2016-11-14; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2017-02-22

的理论依据。

气候类型、自然带、植被带和土壤类型等的形成与分布受地带性的水热分布规律影响。已有研究表明,我国北方三大自然区的气候变化存在显著差异。其中,降水表现为华北、西北和东北地区明显减少,且降幅不同<sup>[8-10]</sup>。同时,自然区域年平均温度和年降水量的增幅呈现出非线性梯度效应<sup>[11]</sup>。此外,在全球变暖的趋势影响下,自然区域降水的高度效应随海拔的高低呈现出不同的变化趋势,即高海拔降水的高度效应增强,而低海拔降水的高度效应减弱<sup>[12]</sup>。因此,区域水热状况的变化,将显著改变植被带分布和土壤理化性质的变化。然而,在较大尺度(中国区域)土壤中N、P元素的研究仍主要集中在耕作土壤与影响因素,以及生态系统组分中植物叶片、根系和凋落物等的研究上,对于较大尺度的不同植被类型和生活型下土壤养分元素的分类研究报道较少。

本文通过对我国典型自然带土壤氮磷化学计量特征的研究,结合自然带和植物生活型的划分,探讨了土壤N、P及其化学计量随海拔、温度和降水的变化特征与变异性,并讨论了土壤N、P空间分异的主要影响因素,以期在较大尺度上揭示土壤N、P及其化学计量的空间变异特征,从而为研究不同植被类型及其生态系统中元素分异与循环,及其对全球变化响应模式提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据获取

本文通过对相关土壤生态化学计量学研究文献中数据的统计,共获得我国各区域自然土壤N、P含量及其化学计量的分析数据594个,数据源时间主要集中在近15年,土壤深度为0~20 cm的自然土壤,因成土因素中的时间因素和母质因素对相对较短时间尺度上自然土壤的形成尤其是表层土壤养分的影响不太明显<sup>[13]</sup>,故在本文中未作考虑,仅考虑了自然带和植物生活型的大尺度主控因素背景下土壤氮磷受温度、降水、海拔的直接影响或交互影响作用。根据已有对自然带及自然带内梯度划分的研究<sup>[14-15]</sup>,以及所获得的各自然带数据,特选取亚热带常绿阔叶林带(SEB)、暖温带阔叶落叶带(WTD)、温带草原带(TSZ)、温带荒漠带(TDE)和青藏高原高寒植被带(QST)5个陆

生自然带作为研究区域,并按原文的植被生活型分类,将研究样地分为草本、灌丛和森林3种生活型土壤。其中亚热带常绿阔叶林带为127个数据(草本47个、灌丛30个、森林50个),暖温带阔叶落叶带125个(草本45个、灌丛27个、森林53个),温带草原带TSZ 115个(草本53个、灌丛22个、森林40个),温带荒漠带112个(草本49个、灌丛25个、森林38个),青藏高原高寒植被带115个(草本60个、灌丛25个、森林30个)。

### 1.2 数据分析

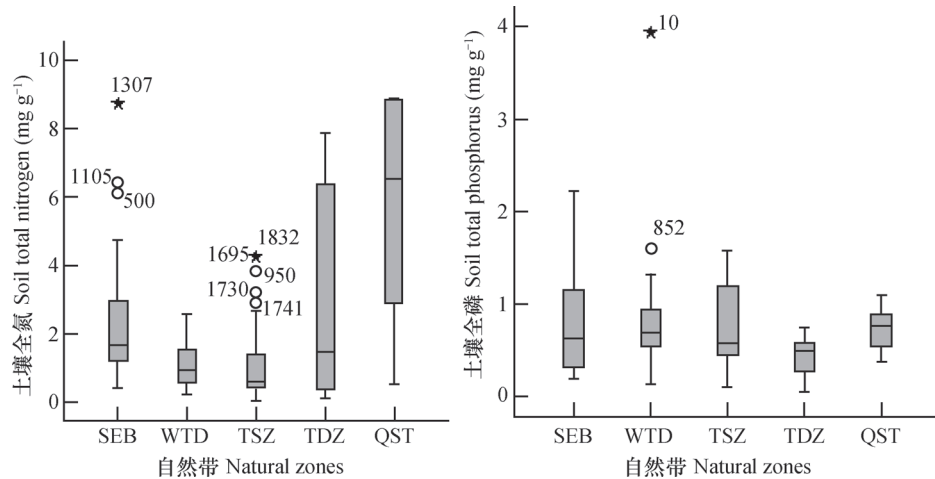
利用单因素方差分析法(One-way ANOVA)、最小显著差数法(LSD)以及斯皮尔曼(Spearman)相关系数分析、多变量线性和非线性回归模型对相关数据进行统计分析,以分析不同自然带内土壤TN和TP含量及其化学计量随海拔高度、温度和降水的分布特征与变异性,数据统计与分析运用SPSS 19.0完成。文中用单峰两端曲线切线斜率的正负来表示具有二次相关关系的单峰模式中变量间的关系,以准确表述两变量在最佳拟合状态下的二次相关性。文中土壤TN和TP数据均来源于原始文献,N/P为摩尔比。不同自然带和不同植物生活型土壤TN和TP的空间变异性采用变异系数(CV)进行评价,变异系数越大则说明数据越分散,该指标的空间变异性越大,其计算公式:

$$\text{变异系数 (CV)} = \frac{\text{标准差 (SD)}}{\text{平均值 (M)}} \times 100\%$$

## 2 结果

### 2.1 不同自然带土壤TN、TP含量及其化学计量特征

各自然带内不同样地的TN和TP数据经整理分类,然后在进行分析之前先进行正态分布检验、异常值检验和各自然带内土壤N、P含量的变异程度检验。根据检验结果(图1),对8个离群值进行了剔除,并对呈偏态分布的带内数据进行常用对数转换,转换后基本呈或接近正态分布。经统计分析得出,亚热带常绿阔叶林带、暖温带阔叶落叶带、温带草原带、温带荒漠带和青藏高原高寒植被带的土壤TN含量平均分别为 $(2.35 \pm 0.87) \text{ mg g}^{-1}$ 、 $(1.13 \pm 0.56) \text{ mg g}^{-1}$ 、 $(1.07 \pm 0.99) \text{ mg g}^{-1}$ 、 $(3.59 \pm 0.89) \text{ mg g}^{-1}$ 和 $(5.66 \pm 0.56) \text{ mg g}^{-1}$ ; TP分别为 $(0.80 \pm 0.66) \text{ mg g}^{-1}$ 、 $(0.82 \pm 0.76) \text{ mg g}^{-1}$ 、 $(0.75 \pm 0.54) \text{ mg g}^{-1}$ 、 $(0.47 \pm 0.31) \text{ mg g}^{-1}$ 和



注：SEB、WTD、TSZ、TDZ和QST分别代表热带常绿阔叶林带、暖温带阔叶落叶带、温带草原带、温带荒漠带和青藏高原高寒植被带。图中显示数据为此海拔处土壤氮磷存在异常值，下同 Note: The SEB、WTD、TSZ、TDZ and QST represent subtropical evergreen broad-leaved forest zone, warm temperate deciduous broad-leaved forest zone, temperate steppe zone, temperate desert zone and Qinghai-Tibet Plateau Alpine vegetation zone respectively. The data in the graph represent outlier of nitrogen or phosphorus at this elevation. The same below

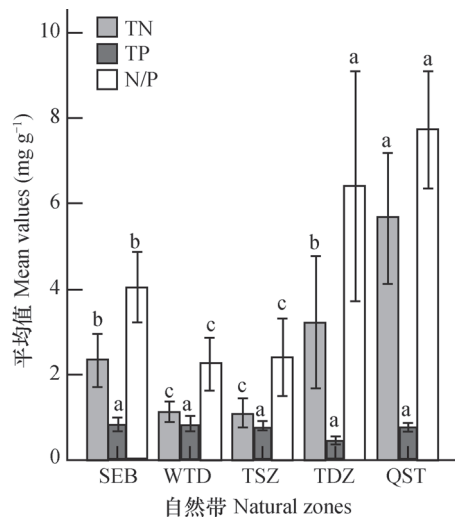
图1 不同自然带和海拔梯度下土壤全氮和全磷的数据变异程度、正态分布及异常值检验

Fig. 1 Variation, normal distribution and outlier test of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in the soil relative to natural zone and elevation

( $0.75 \pm 0.28$ )  $\text{mg g}^{-1}$ ; 土壤N/P分别为4.04、2.26、2.49、6.71和7.73。5个自然带内青藏高原高寒植被带土壤的TN和N/P均大于其他4个自然带 ( $p < 0.001$ ,  $p < 0.01$ ); TP最大值出现在青藏高原高寒植被带, 最小值在温带荒漠带, 方差分析显示: 5个自然带间TP除温带荒漠带显著小于其他自然带之外其余自然带间差异并不显著 ( $p > 0.05$ ); TN和N/P差异显著 ( $p < 0.01$ ), 但在暖温带阔叶落叶带和温带草原带差异不显著 (图2)。而且TN、TP的空间变异性在各自然带中, 暖温带阔叶落叶带、温带草原带和温带荒漠带土壤TN、TP和N/P的变异性均较大 (仅温带荒漠带的土壤全磷相对较小), 三个自然带内海拔、温度和降水的较高变异性分别为68%、75%和78%, 而各自然带间TN、TP和N/P也具有高度变异性, 分别为108%、64%和92%。说明氮磷空间变异的影响因素有很大区别, 而海拔、温度和降水的影响或交互作用有可能是主要因素。

## 2.2 植物生活型与海拔交互作用下土壤氮磷的变化模式

如表1所示, 草本土壤和灌丛土壤的TN与海拔高度均呈显著正相关, 二次拟合最优, 而森林土壤的TN与海拔呈显著负-正二次相关, 拐点在1 100 m左右。森林土壤的TP随海拔呈二次显著正-负相关



注：图中小写字母代表各自然带间TN、TP及N/P在0.05水平上的差异显著性 Note: The lowercase letters represent significant differences in soil TN, TP and N/P between natural zones at the 0.05 level

图2 不同自然带内氮磷含量及氮磷比均值变化特征

Fig. 2 Variation of nitrogen and phosphorus contents and N/P ratio relative to natural zone

关系变化, 拐点均1 800 m左右。然而除森林土壤外, 另外两种生活型土壤的TP与海拔的相关性均未达到显著水平。草本土壤和森林土壤的N/P随海拔呈显著负-正二次相关, 拐点分别为1 300 m和

表1 氮磷含量及其化学计量比在不同生活型下的海拔变化模式

生活型 Life forms	y	a	b	c	R <sup>2</sup>	p	n
草本 Herbs	TN	0.001	$2.87 \times 10^{-8}$	-0.467	0.5	< 0.001	254
	N/P	-0.001	$5.32 \times 10^{-7}$	2.672	0.375	< 0.001	254
灌丛 Shrub	TN	$1.39 \times 10^{-4}$	$3.10 \times 10^{-7}$	0.468	0.489	0.005	129
森林 Forest	TN	-0.002	$1.09 \times 10^{-6}$	2.514	0.563	< 0.001	129
	TP	0.001	$1.75 \times 10^{-7}$	4.494	0.121	0.012	129
	N/P	-0.005	$2.27 \times 10^{-6}$	5.418	0.606	< 0.001	129

注: 表中二次方程的一般形式为 $y = ax + bx^2 + c$  ( $x$ 为海拔高度)。n为样本数。下同 Note: The general form of quadratic equation in the table is  $y = ax + bx^2 + c$  ( $x$  represent elevation). n is sample number. The same below

1 100 m, 但灌丛土壤N/P与海拔的相关性不显著。拐点的存在反映了海拔的梯度性对不同植物生活型土壤氮磷丰缺存在阈值, 且海拔梯度对森林土壤TN的影响要复杂于草本土壤和灌丛土壤, 海拔超过1 800 m森林土壤TP逐渐降低, 而N/P减小的临界海拔为1 100 m, 说明森林土壤对土壤TN的敏感海拔要高于土壤TP。在1 100~1 800 m内, 森林受氮限制作用强与磷, 海拔超过1 800 m, 随海拔的增高, 高海拔区森林林木受氮、磷的共同限制或二者均不限制, 而海拔1 100 m和1 800 m则是限制作用的临界段。

### 2.3 自然带、植物生活型、海拔及气候因子对土壤氮磷的交互影响

不同自然带内不同生活型土壤的TN、TP及N/P与海拔、降水和温度的相关性存在差异(此处仅说明存在显著相关关系的变量, 未加说明的则为无明显相关性或相关性较弱)。如表2所示, 亚热带常绿阔叶林带森林土壤TN与海拔呈显著线性正相关回归方程为:  $y = 0.002x + 1.398$ ,  $R^2=0.252$ ,  $p < 0.01$ ;  $x$ 为海拔,  $y$ 为TN。TP和N/P则与海拔呈显著二次正-负和负-正相关(表2), 拐点在1 120 m和750 m左右。TN和TP与温度呈显著二次正-负相关(表2), 拐点位于20.3℃左右。TP与降水为显著二次负-正相关关系(表2), N/P则相反, 拐点在2 000 mm左右。表明亚热带常绿阔叶林带森林土壤TN主要受温度和海拔的交互影响, 但以温度为主; TP则受三个因素的共同影响, 表现为降水 > 温度 > 海拔; 对N/P的影响同样降水大于海拔。

暖温带阔叶落叶林带草本土壤N/P与降水表

现出显著线性正相关关系:  $y = 0.014x - 5.489$ ,  $R^2=0.289$ ,  $p < 0.05$ ;  $x$ 为降水,  $y$ 为N/P。而森林土壤TP与海拔和N/P与温度均呈显著二次负-正相关(表2), 拐点分别在1 400 m和9℃左右。说明森林土壤的TP主要受控于海拔高度, 而草本土壤和森林土壤N/P则分别主控于温度和降水, 交互影响不显著。

温带草原带草本土壤的TN和N/P与海拔, TN和N/P与温度均为显著线性负相关, 回归方程分别为:  $y = -0.002x + 3.031$ ,  $R^2=0.324$ ,  $p < 0.01$ ;  $x$ 为海拔,  $y$ 为TN;  $y = -0.006x + 9.742$ ,  $R^2=0.675$ ,  $p < 0.01$ ;  $x$ 为海拔,  $y$ 为N/P;  $y = -0.145x + 1.612$ ,  $R^2=0.629$ ,  $p < 0.01$ ;  $x$ 为温度,  $y$ 为TN;  $y = -0.406x + 4.312$ ,  $R^2=0.823$ ,  $p < 0.01$ ;  $x$ 为温度,  $y$ 为N/P。而TP与降水则呈显著线性正相关, 回归方程为:  $y = 0.002x - 0.048$ ,  $R^2=0.403$ ,  $p < 0.05$ ;  $x$ 为降水,  $y$ 为TP。N/P与降水显著二次正-负相关(表2), 拐点在250 mm左右。森林土壤的TN和N/P与分别为海拔呈显著二次负-正相关(表2)和显著正相关, 线性回归方程为:  $y = 0.006x - 1.704$ ,  $R^2=0.332$ ,  $p < 0.05$ ;  $x$ 为海拔,  $y$ 为N/P, 拐点约为1 110 m。表明草本土壤TN主要受海拔和温度的影响, 而海拔的决定因素较大; TP主要受降水的影响; N/P则受温度、降水和海拔的交互或共同影响, 影响程度表现为温度 > 海拔 > 降水。森林土壤的TN主要受海拔的影响; N/P受海拔和降水二者的共同影响, 但影响程度海拔大于降水。TP与三者均未表现出显著相关性(表2)。



表2 土壤氮磷及其化学计量比在自然带内不同生活型下与海拔和气候因子的变化模式

Table 2 Variation of soil nitrogen, soil phosphorus and their stoichiometric ratio relative to plant life form, elevation and climate factors within a natural zone

自然带 Natural zones	生活型 Life forms	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	$R^2$	<i>n</i>	
亚热带常绿阔 叶林带 SEB	森林 Forest	海拔 Elevation	TP	0.002	$-8.38 \times 10^{-7}$	0.081	0.379	50	
		温度 Temperature	N/P	-0.011	$7.14 \times 10^{-6}$	7.201	0.213	50	
		降水 Precipitation	TN	14.38	-0.371	-135.6	0.26	50	
		TP	3.191	-0.08	-30.73	0.324	50		
		N/P	-0.003	$7.80 \times 10^{-7}$	3.5	0.369	50		
暖温带阔叶落 叶带WTD	森林 Forest	海拔 Elevation	TP	-0.006	$2.15 \times 10^{-6}$	5.063	0.587	40	
		温度 Temperature	N/P	-5.682	0.297	29.26	0.366	40	
		降水 Precipitation	N/P	0.104	$-2.06 \times 10^{-4}$	-7.631	0.422	53	
温带草原带 TSZ	草本 Herbs	降水 Precipitation	N/P	0.104	$-2.06 \times 10^{-4}$	-7.631	0.422	53	
		森林 Forest	海拔 Elevation	TN	-0.023	$1.09 \times 10^{-5}$	12.92	0.584	38
		森林 Forest	海拔 Elevation	N/P	-0.012	$5.81 \times 10^{-6}$	6.803	0.535	38
温带荒漠TDZ	森林 Forest	海拔 Elevation	TP	-0.252	$4.04 \times 10^{-6}$	37.99	0.945	30	
		森林 Forest	海拔 Elevation	N/P	0.494	$-7.97 \times 10^{-5}$	-749.96	0.85	30
青藏高原高寒 植被带 QST	草本 Herbs	海拔 Elevation	TP	0.005	$-6.24 \times 10^{-7}$	-7.403	0.505	60	
		温度 Temperature	N/P	0.371	-0.489	0.522	0.346	60	
		降水 Precipitation	N/P	0.174	$-1.73 \times 10^{-4}$	-34.92	0.46	60	
		TP	0.174	$-1.73 \times 10^{-4}$	-34.92	0.46	60		

温带荒漠带草本土壤的TN和N/P与海拔, TN和N/P与降水均表现出显著线性正相关关系, 回归方程分别为:  $\lg y = 0.002x - 2.607$ ,  $R^2 = 0.887$ ,  $p < 0.01$ ;  $x$ 为海拔,  $y$ 为TN;  $y = 0.003x - 3.332$ ,  $R^2 = 0.897$ ,  $p < 0.01$ ;  $x$ 为海拔,  $y$ 为N/P;  $y = 0.007x - 0.634$ ,  $R^2 = 0.856$ ,  $p < 0.05$ ;  $x$ 为降水,  $y$ 为N/P;  $y = 0.011x - 0.503$ ,  $R^2 = 0.948$ ,  $p < 0.01$ ;  $x$ 为降水,  $y$ 为N/P。土壤N/P与温度呈显著线性负相关, 得到回归方程:  $y = -0.172x + 2.687$ ,  $R^2 = 0.565$ ,  $p < 0.05$ ;  $x$ 为温度,  $y$ 为N/P。森林土壤TN与海拔和降水均呈线性显著正相关, 回归方程为:  $y = 0.005x - 7.707$ ,  $R^2 = 0.929$ ,  $p < 0.05$ ;  $x$ 为海拔,  $y$ 为TN;  $y = 0.018x - 0.899$ ,  $R^2 = 0.676$ ,  $p < 0.05$ ;  $x$ 为降水,  $y$ 为TN。TP与海拔呈二次负-

正极显著相关关系(表2); N/P与海拔的相关性则相反, 拐点均位于海拔3 100 m左右(表2)。说明草本土壤TN主要受控于海拔和降水作用, 但降水影响程度较强; TP与三者无显著相关性; 而N/P则受三者交互影响显著, 但影响程度表现为温度 > 降水 > 海拔; 森林土壤TN主要受海拔和降水影响, 但降水影响较大; TP和N/P则主要受海拔驱动。

青藏高原高寒植被带草本土壤TP与海拔、N/P与温度和降水均呈显著二次正-负相关(表2), 拐点分别为3 800 m、0.5℃和500 mm, 而N/P与海拔则表现出显著线性负相关关系, 线性回归方程为:  $y = -0.003x - 19.43$ ,  $R^2 = 0.252$ ,  $p < 0.05$ ;  $x$ 为海拔,  $y$ 为N/P。表明TP主控于海拔, 而N/P则受三者的交互或共同作用, 但以温度影响为主, 其次是降

水, 海拔影响相对较小。

上述二次相关的单峰模式说明各自然带下不同生活型土壤的TN、TP及化学计量值随海拔、温度和降水的变化出现了明显的突变点, 其中, 温带草原带土壤TN(森林土壤)与海拔间的相关关系在1 100 m处发生突变, 其余带内TN与海拔均无拐点存在而呈线性变化, 与温度则在20℃左右(亚热带常绿阔叶林带森林土壤)有一拐点, 而与降水关系的转折点只存在于带间, 带内则只有在温带荒漠带内与之呈显著正相关, 其余带内均无明显相关性, 说明这两个拐点可能是该带内土壤—植物TN供需平衡的阈值。类似于以上分析, 得出土壤TP的阈值在亚热带常绿阔叶林带(森林土壤)为1 200 m(海拔)、19.5℃(温度)、2 000 mm(降水), 暖温带阔叶落叶林带(森林土壤)为1 500 m、9℃, 温带荒漠带(草本土壤)为3 100 m, 青藏高原高寒植被带(草本土壤)为3 800 m、0.5℃、500 mm。土壤N/P的阈值在亚热带常绿阔叶林带(森林土壤)为750 m、2 000 mm, 温带草原带为1 100 m(森林土壤)和250 mm(草本土壤), 而在温带荒漠带和青藏高原高寒植被带内N/P的拐点则与TP类似。

## 3 讨 论

### 3.1 植物生活型、海拔、气候对土壤氮磷分异的影响

植物生活型、海拔及气候等对土壤中营养元素循环有着显著影响<sup>[13, 15]</sup>, 其相互作用, 共同决定土壤养分的空间分异<sup>[5]</sup>。从上述对不同自然带下土壤TN、TP含量及其化学计量比的分析可以发现, 对各自然带下土壤养分元素含量分异的主要控制因素在不同自然带具有一定的差异性。除温带荒漠带土壤TP外, 暖温带阔叶落叶林带、温带草原带和温带荒漠带土壤TN、TP及N/P的分异性较大, 三个自然带内海拔和气象要素与土壤氮磷间的相关性说明, 自然带间TN、TP和N/P的高度分异性主要受海拔与气象要素共同控制。而在亚热带常绿阔叶林带土壤中, TN与海拔间二次负—正相关及TP与N/P间反相关说明, 在研究该区域土壤氮磷的分异时应首先考虑海拔高度对其的影响; 而在青藏高原高寒植被带中, TN、TP和N/P的分异则主要受控其海拔高度和极低温度。此外, 亚热带常绿阔叶

林带土壤氮磷及其比率随海拔的变化趋势表明, 土壤TN随海拔升高呈先增后减的单峰趋势, 这一点已经在研究中得到验证<sup>[16-17]</sup>, 但也存在差异之处<sup>[2]</sup>, 其原因可能本文研究样点较多、海拔相对高差较大以及进行了二次非线性回归。因此, 在研究不同区域土壤营养元素循环及分异时, 需考虑的主控因素时常不同。

海拔、植物生活型、气候对土壤氮磷的耦合作用在不同自然带存在差异性, 其根本原因是原始土壤母质、变化中的气候、差异巨大的地形、时间因素和人类活动共同作用, 形成了无论是大尺度还是小尺度上均具有一定空间异质性的现代土壤<sup>[18-19]</sup>, 但原始土壤母质仅对原始土壤的形成起关键作用, 这方面研究可从全国土壤类型划分中看出, 时间因素则是一个长期演化考虑的因素, 短期内对土壤演化及养分循环甚微, 人为因素主要影响耕作土壤的演化和养分流动<sup>[20]</sup>。因此, 最能体现土壤空间变异驱动的为海拔地形因素、植物生活型及不断变化中的气候因子。而三者有的能改变水热梯度, 有的则受水热梯度的驱动。水热梯度正是自然带分异的重要驱动因素, 由此得出, 各自然带内土壤—植物养分的供需平衡及元素的循环梯度是植物遵循生长速率与动态平衡的适应性结果<sup>[5]</sup>。具体地, 则体现在不同自然带下, 土壤氮磷分别或共同与水热反映因子和驱动因子的相关性上, 例如, 不同自然带内不同生活型土壤与海拔、温度和降水的相关性说明, 海拔、温度和降水对区域尺度下土壤氮磷既有主控影响, 也存在交互作用。对于TN而言, 在亚热带常绿阔叶林带森林土壤和温带草原带草本土壤主要受温度和海拔的影响, 在温带草原带森林土壤则受海拔的影响显著, 而在温带荒漠带草本土壤和森林土壤则主要受海拔和降水作用影响, 但暖温带落叶阔叶林带和青藏高原高寒植被带不同生活型下TN受三个影响因素的影响均不明显。TP则在亚热带常绿阔叶林带森林土壤受三个因素的交互影响, 表现为: 降水 > 温度 > 海拔, 而在暖温带落叶阔叶林带和温带荒漠带森林土壤以及青藏高原高寒植被带草本土壤主要受海拔的主控影响, 但温带草原带草本土壤TP主控于降水因子。然而, 亚热带常绿阔叶林带森林土壤N/P受降水的影响大于海拔; 暖温带落叶阔叶林带草本和森林土壤N/P主要受控于温度和降水; 温带草原带、温带荒漠带和青藏高原高寒植被带草本土壤N/P则受温度、降水和海拔的

共同作用,但温带荒漠带森林土壤N/P则主要受海拔的影响,而温带草原带森林土壤N/P受海拔和降水二者的影响,但影响程度不同。此外,上述各自然带内不同植物生活型土壤TN、TP及其比率与海拔、温度和降水在相关性方面均存在不同梯度的阈值或拐点,说明自然带与植物生活型在大尺度水热状况和生物因子调控上起着决定性作用。而海拔、温度和降水则是直接影响因素或区域驱动因子。而且,不同自然带垂直带谱上具有差异和相似的双重性。

### 3.2 全球变化下各自然带土壤氮磷的调控

自然带是自然地带性中三维地带性共同作用的产物<sup>[21]</sup>。土壤养分与海拔高度间的变化关系反映了垂直带性从属于一定水平地带性的原则。在生态景观中,植物生活型则是诸多因素的共同产物,但它们的共同作用于土壤养分的调控<sup>[13]</sup>。自然带的主导因素是气候与气象条件,其分布规律的基础是水分、热量和水热状况组合的差异性。因此,水热状况的地带性能够反映气候带和自然带的地带性。如TN、TP及N/P的变异性在温带草原和温带荒漠带的低海拔和高海拔区之所以不同,是因为温度和降水在此两带起着决定性作用。而温度和降水则是全球气候变化的直接反映。

已有研究表明,青藏高原正处于剧烈升温阶段<sup>[9]</sup>,且该区部分草地退化是由气候暖干化引起<sup>[22]</sup>。而本研究中,青藏高原高寒植被带除TN与海拔、温度和降水的相关性不显著外,TP与海拔、N/P与温度和降水均呈显著二次正-负相关,即海拔与温度分别是影响土壤TP和N/P的主控因素。因此,未来气温升高可能对不同海拔梯度上土壤养分的影响不同,较低海拔区可能因土壤N/P增大而造成植物磷限制,较高海拔区可能受氮限制。然而,山地的形成虽然能影响降水和温度,且在一定程度上能浓缩水平地带,但二者的差异性也不容忽视<sup>[23]</sup>。此类研究前人在暖温带阔叶落叶林带、温带草原带和温带荒漠带的研究较为集中,且海拔梯度和纬度梯度效应较为明显的是黄土高原的草原、森林草原和森林区<sup>[24-26]</sup>、贺兰山垂直带谱<sup>[27]</sup>、祁连山东部山缘<sup>[28-29]</sup>等,本研究与上述海拔高梯度效应以及气候因子影响的研究相比,结论部分一致,不同在于本研究中TN、TP含量及N/P的变异存在较为显著的差异性。

全球变化的另一个调控作用体现在植物生活

型调控作用上。草本土壤、灌丛土壤和森林土壤间TN和N/P存在显著差异( $p < 0.01$ ;  $p < 0.01$ ),TP差异性不明显( $p > 0.05$ ),其变异性高达105%、94%和45%,反映了不同自然带不同生活型植物土壤养分的差异性不同,土壤对地上有机体提供养分的能力也不同。这支持不同生活型植物对土壤的理化性质有重要影响的说法,即土壤异质性也会受到植被类型和植物生活型的重要影响<sup>[30-31]</sup>。其差异性主要在于两个方面:一是不同生活型植物凋落物的质和量不同<sup>[32]</sup>,使得归还土壤的养分量 and 微生物的矿化速率存在差异<sup>[33]</sup>;另一方面,不同气候带、自然带内分布的植被类型存在差异,这使得他们对全球气候变化的响应程度不同。青藏高原是对气候变化最为敏感和脆弱的地区之一,全球变暖背景下将对其土壤微生物量及土壤氮的矿化程度产生强烈影响,从而影响植物的生长速率和碳汇能力及生产力<sup>[34]</sup>。因此,土壤既是全球变化承受体,同时也是反馈者,研究土壤养分或土壤-植被系统养分的生物地球化学循环对研究全球变化的区域生态响应应具有十分重要的意义。

## 4 结论

5个自然带亚热带常绿阔叶林带、暖温带阔叶落叶林带、温带草原带、温带荒漠带和青藏高原高寒植被带内土壤的TN和N/P存在显著差异,而TP的变化不明显。土壤中TN、TP及N/P在各自然带内随海拔变化均呈二次相关,表现为单峰模式;海拔变化引起的水热状况改变,使得土壤氮磷发生分异,进而使氮磷出现阈值变化。因此,土壤氮磷及其化学计量比的空间分异主要由温度、降水、海拔因素以及不同植物生活型的主控作用或交互作用调控,而自然带和植物生活型是主控背景,海拔、温度和降水的影响及交互影响则是直接影响因素或区域驱动因子。在全球变暖的趋势下,不同海拔梯度上对土壤养分的限制元素可能不同,较低海拔区可能因土壤N/P增大而造成植物磷限制,较高海拔区可能受氮限制。

### 参考文献

- [1] Han W X, Fang J Y, Guo D, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. *New Phytologist*, 2005, 168 (2):

- 377—385
- [ 2 ] 张广帅, 邓浩俊, 杜锬, 等. 泥石流频发区山地不同海拔土壤化学计量特征——以云南省小江流域为例. 生态学报, 2016, 36 ( 3 ) : 675—687  
Zhang G S, Deng H J, Du K, et al. Soil stoichiometry characteristics at different elevation gradients of a mountain in an area with high frequency debris flow: A case study in Xiaojiang Watershed, Yunnan ( In Chinese ). *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 ( 3 ) : 675—687
- [ 3 ] 卢同平, 史正涛, 牛洁, 等. 我国陆生生态化学计量学应用研究进展与展望. 土壤, 2016, 48 ( 1 ) : 29—35  
Lu T P, Shi Z T, Niu J, et al. Research progresses and prospects of terrestrial ecological stoichiometry in China ( In Chinese ). *Soils*, 2016, 48 ( 1 ) : 29—35
- [ 4 ] Giardina C P, Ryan M G. Biogeochemistry: Soil warming and organic carbon content reply. *Nature*, 2002, 408 ( 6814 ) : 789—790
- [ 5 ] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2004, 101 ( 30 ) : 11001—11006
- [ 6 ] 樊江文, 张良侠, 张文彦, 等. 中国草地样带植物根系N、P元素特征及其与地理气候因子的关系. 草业学报, 2014, 23 ( 5 ) : 69—76  
Fan J W, Zhang L X, Zhang W Y, et al. Plant root N and P levels and their relationship to geographical and climate factors in a Chinese grassland transect ( In Chinese ). *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23 ( 5 ) : 69—76
- [ 7 ] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的化学计量特征. 生态学报, 2008, 28 ( 8 ) : 3937—3947  
Wang S Q, Yu G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements ( In Chinese ). *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 ( 8 ) : 3937—3947
- [ 8 ] 黄亮, 高苹, 谢小萍, 等. 全球增暖背景下中国干湿气候带变化规律研究. 气象科学, 2013, 33 ( 5 ) : 570—576  
Huang L, Gao P, Xie X P, et al. Variation laws of wet and dry climatic zones in China under global warming ( In Chinese ). *Journal of the Meteorological Sciences*, 2013, 33 ( 5 ) : 570—576
- [ 9 ] 李林, 陈晓光, 王振宇, 等. 青藏高原区域气候变化及其差异性研究. 气候变化研究进展, 2010, 6 ( 3 ) : 181—186  
Li L, Chen X G, Wang Z Y, et al. Climate change and its regional differences over the Tibetan Plateau ( In Chinese ). *Advances in Climate Change Research*, 2010, 6 ( 3 ) : 181—186
- [ 10 ] IPCC. *Climate change 2007: The physical science basis* // Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Contribution of working-group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- [ 11 ] 史玉光, 杨青, 魏文寿. 沙漠绿洲-高山冰雪气候带的垂直变化特征研究. 中国沙漠, 2003, 23 ( 5 ) : 488—492  
Shi Y G, Yang Q, Wei W S. Research about the vertical change in the climatic zones of desert oasis to alp ice-snow ( In Chinese ). *Journal of Desert Research*, 2003, 23 ( 5 ) : 488—492
- [ 12 ] 卢爱刚. 全球变暖背景下中国区域响应的差异性研究. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2006  
Lu A G. Research on the difference of regional response of China under the background of global warming ( In Chinese ). Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2006
- [ 13 ] 尚玉昌. 普通生态学. 北京: 北京大学出版社, 2010: 55—78  
Shang Y C. *General ecology* ( In Chinese ). Beijing: Peking University Press, 2010: 55—78
- [ 14 ] 彭补拙, 陈浮. 中国山地垂直自然带研究的进展. 地理科学, 1999, 19 ( 4 ) : 303—308  
Peng B Z, Chen F. Progress in the study of mountain vertical zonation in China ( In Chinese ). *Scientia Geographica Sinica*, 1999, 19 ( 4 ) : 303—308
- [ 15 ] 中国科学院《中国自然地理》编辑委员会. 中国自然地理—植物地理. 北京: 科学出版社, 1988: 82—113  
Editorial Board of Physical Geography of China, Chinese Academy of Sciences. *Physical geography of China—Phytogeography* ( In Chinese ). Beijing: Science Press, 1988: 82—113
- [ 16 ] 张继平, 张林波, 王凤玉, 等. 井冈山自然保护区森林土壤养分含量的空间变化. 土壤, 2014, 46 ( 2 ) : 262—268  
Zhang J P, Zhang L B, Wang F Y, et al. Spatial variation of soil nutrient contents in the Jinggangshan National Nature Reserve ( In Chinese ). *Soils*, 2014, 46 ( 2 ) : 262—268
- [ 17 ] 刘合满, 曹丽花, 曾加芹. 藏东南色季拉山沟壑区土壤氮素分布特征. 生态学报, 2016, 36 ( 1 ) : 127—133  
Liu H M, Cao L H, Zeng J Q. Spatial distribution of soil nitrogen in gully hillsides of Sejila Mountain, Southeastern Tibet ( In Chinese ). *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 ( 1 ) : 127—133
- [ 18 ] 张文敏, 姜小三, 吴明, 等. 杭州湾南岸土壤有机碳



- 空间异质性研究. 土壤学报, 2014, 51 (5): 1087—1095
- Zhang W M, Jang X S, Wu M. Spatial heterogeneity of soil organic carbon on the south coast of Hangzhou Bay (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (5): 1087—1095
- [19] 罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 近30年川中丘陵区不同土地利用方式土壤碳氮磷生态化学计量特征变化. 土壤, 2016, 48 (4): 726—733
- Luo Y L, Li Q Q, Wang C Q, et al. Last 30a Changes of C, N and P ecological stoichiometry of different land use types in hilly area of Mid-Sichuan Basin, southwest China (In Chinese). *Soils*, 2016, 48 (4): 726—733
- [20] 周丽丽, 李婧楠, 米彩虹, 等. 秸秆生物炭输入对冻融期棕壤磷有效性的影响. 土壤学报, 2017, 54 (1): 171—179
- Zhou L L, Li J N, Mi C H, et al. Effect of straw biochar on availability of phosphorus in brown soil during the freezing and thawing period. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (1): 171—179
- [21] 黄秉维, 郑度, 赵明茶, 等. 现代自然地理. 北京: 科学出版社, 1999: 53—86
- Huang B W, Zheng D, Zhao M C, et al. Modern natural geography (In Chinese). Beijing: Science Press, 1999: 53—86
- [22] 孟凡栋, 汪诗平, 白玲. 青藏高原气候变化与高寒草地. 广西植物, 2014, 34 (2): 269—275
- Meng F D, Wang S P, Bai L. The climate change and alpine grassland on the Tibetan Plateau (In Chinese). *Guihaia*, 2014, 34 (2): 269—275
- [23] 刘亚兰, 郭汝清, 孙书存. 中国亚热带山地植被垂直带分布对气候季节性的响应. 生态学报, 2010, 30 (14): 3912—3922
- Liu Y L, Guo R Q, Sun S C. Variations in the vertical vegetation zonation of subtropical Chinese mountains: The importance of climatic seasonality (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30 (14): 3912—3922
- [24] 曾全超, 李鑫, 董扬红, 等. 陕北黄土高原土壤性质及其生态化学计量的纬度变化特征. 自然资源学报, 2015, 33 (5): 870—879
- Zeng Q C, Li X, Dong Y H, et al. Ecological stoichiometry characteristics and physical-chemical properties of soils at different latitudes on the Loess Plateau (In Chinese). *Journal of Natural Resources*, 2015, 33 (5): 870—879
- [25] 李婷, 邓强, 袁志友, 等. 黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征. 环境科学, 2015, 36 (8): 2988—2996
- Li T, Deng Q, Yuan Z Y, et al. Latitudinal changes in plant stoichiometric and soil C, N, P stoichiometry in Loess Plateau (In Chinese). *Environmental Science*, 2015, 36 (8): 2988—2996
- [26] 陆媛, 陈云明, 曹扬, 等. 黄土高原子午岭辽东栎林植物和土壤碳氮磷化学计量学特征. 水土保持学报, 2015, 29 (3): 196—201
- Lu Y, Chen Y M, Cao Y, et al. C, N and P stoichiometric characteristics of plants and soil in *Quercus liaotungensis* forest on Ziuling Mountain of Loess Plateau (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29 (3): 196—201
- [27] 江世高, 尚振艳, 牛得草, 等. 贺兰山西坡草地植物多样性与其叶片C:N:P计量比的关系. 干旱区研究, 2014, 31 (3): 523—529
- Jiang S G, Shang Z Y, Niu D C, et al. Relationship between grassland plant diversity and foliar C:N:P stoichiometry on the western slope of the Helan Mountain (In Chinese). *Arid Zone Research*, 2014, 31 (3): 523—529
- [28] 齐鹏, 刘贤德, 赵维俊, 等. 祁连山中段青海云杉林土壤养分特征. 山地学报, 2015, 33 (5): 538—545
- Qi P, Liu X D, Zhao W J, et al. Soil nutrient characteristics of *Picea crassifolia* forest in the middle segment of Qilian Mountains (In Chinese). *Journal of Mountain Science*, 2015, 33 (5): 538—545
- [29] 赵维俊, 刘贤德, 金铭, 等. 祁连山青海云杉林叶片—枯落物—土壤的碳氮磷生态化学计量特征. 土壤学报, 2016, 53 (2): 477—489
- Zhao W J, Liu X D, Jin M, et al. Ecological stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in leaf-litter-soil system of *Picea crassifolia* forest in the Qilian Mountains (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (2): 477—489
- [30] Trangmar B B, Yost R S, Uehara G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advanced Agronomy*, 1985, 38: 44—94
- [31] Lu T P, Zhang W X, Niu J, et al. The vertical characteristics of soil carbon and nitrogen at different rubber plantation ages in Xishuangbanna, Southwest China. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2017, 26 (2): 1431—1439
- [32] 马任甜, 方瑛, 安韶山. 云雾山草地植物地上部分和枯落物的碳、氮、磷生态化学计量特征. 土壤学报, 2016, 53 (5): 1170—1180
- Ma R T, Fang Y, An S S. Ecological stoichiometry of carbon, nitrogen, phosphorus and C:N:P in shoots and litter of plants in grassland in Yunwu Mountain (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (5):

- 1170—1180
- [ 33 ] Atiwill P M, Adams M A. Nutrient cycling in forests. *New Phytologist*, 1993, 124 ( 4 ) : 561—582
- [ 34 ] 吴建国, 韩梅, 裴伟, 等. 祁连山中部高寒草甸土壤氮矿化及其影响因素研究. *草业学报*, 2007, 16 ( 6 ) : 39—46
- Wu J G, Han M, Chang W, et al. The mineralization of soil nitrogen and its influenced factors under alpine meadows in Qilian Mountains ( In Chinese ). *Acta Prataculturae Sinica*, 2007, 16 ( 6 ) : 39—46

## Study on Spatial Variability and Driving Factors of Stoichiometry of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Typical Natural Zones of China

LU Tongping<sup>1, 2</sup> ZHANG Wenxiang<sup>1, 2†</sup> NIU Jie<sup>1, 2</sup> LIN Yongjing<sup>1, 2</sup> WU Mengjuan<sup>1, 2</sup>

( 1 *Laboratory of Plateau Lake Ecology and Global Change, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China* )

( 2 *Key Laboratory of Plateau Geographical Process and Environmental Change of Yunnan Province, Kunming 650098, China* )

**Abstract** 【Objective】 Nitrogen ( N ) and phosphorus ( P ) are two important nutrients and play important role in sustaining plant growth in natural ecosystems, and changes in structure and function of an ecosystem may reflect in stoichiometric characteristics of the elements in the soil. Natural zone, life form and elevation are major factors affecting soil nutrients in all climatic zones. Therefore, the study on stoichiometric characteristics on large spatial scales may help explore distribution characteristics of soil nutrients and driving factors of the evolution of soil nutrients, and provide important reference to studies to understand in depth global biogeochemical recycling of the soil nutrients and simulate regional responses to global change.

【Method】 From the literature available regarding soil stoichiometry in the subtropical evergreen broad-leaved forest zone ( SEB ), warm temperate deciduous broad-leaved forest zone ( WTD ), temperate steppe zone ( TSZ ), temperate desert zone ( TDZ ) and Qinghai-Tibet Plateau Alpine vegetation zones ( QST ), a total of 594 data of N and P contents in natural soils, 0–20 cm in depth of various regions of the country and their stoichiometric analyses, covering a time span of 15 years were acquired using the aid of electronic search engines. Statistic analysis of the collected data were performed using methods of one-way analysis of variance ( ANOVA ), least significant difference ( LSD ), Spearman correlation coefficient analysis, and multivariate linear and non-linear autoregressive modeling ( MAR ), to explore distribution and variability of soil total nitrogen ( TN ) and total phosphorus ( TP ) and their stoichiometry in soil in relation to elevation, temperature and precipitation in the SEB, WTD, TSZ, TDZ and QST. 【Result】 Results show that soil TN and N/P varied significantly from natural zone to natural zone, but soil TP did not as much. The average TN content was 2.35 mg g<sup>-1</sup>, 1.13 mg g<sup>-1</sup>, 1.07 mg g<sup>-1</sup>, 3.59 mg g<sup>-1</sup>, and 5.66 mg g<sup>-1</sup>; the average TP content 0.80 mg g<sup>-1</sup>, 0.82 mg g<sup>-1</sup>, 0.75 mg g<sup>-1</sup>, 0.47 mg g<sup>-1</sup>, and 0.75 mg g<sup>-1</sup>; and the average N/P 4.04, 2.26, 2.49, 6.71, and 7.73 in the SEB, WTD, TSZ, TDZ and QST, respectively. In all the five zones, TN, TP and N/P varied with elevation, displaying a non-linear secondary relationship, and a single peak pattern. However, in the SEB and TSZ soil TN was mainly affected by temperature and elevation, and the impact of elevation was more significant in the TSZ. In the TDZ soil TN was influenced by elevation and precipitation. However, in the WTD and QST, soil TN was not so much affected by the three factors. In the SEB, soil TP was jointly affected by the three natural factors, which, however, followed a declining order of precipitation > temperature > elevation in extent, and in the WTD and TDZ and QST soil TP was mainly affected by elevation, while in the TSZ, precipitation was the dominant factor that affects soil TP. Furthermore, in the SEB, soil N/P was more affected by precipitation than by elevation, and in the TSZ, TDZ and QST it

was affected jointly by all the three factors, temperature, precipitation and elevation, while in the TDZ, elevation was the key factor affecting soil N/P and in the TSZ, temperature and precipitation were, but differed in degree of the effect. 【Conclusion】 In different natural zones, the relationships of TN, TP and N/P in the soil with elevation, temperature and precipitation differ from natural zone to natural zone or from plant life form to plant life forms, which the impacts of elevation, temperature and precipitation on soil N, P and N/P vary with the natural zone or plant life form. Therefore, natural zone and plant life form are the important factors affecting spatial variability of soil nutrients, and elevation, temperature and precipitation are the driving factors of the variation of soil N and P. In the future, global warming may have significant effects on soil nutrients and the effects vary with elevation gradients. In areas low in elevation, increment of soil N/P may turn P into a major factor limiting growth of the plants, while in areas high in elevation, N may be the factor.

**Key words** Natural zone; Plant life form; Elevation gradient; Climatic factors; Dominant control factors

(责任编辑: 陈荣府)