DOI: 10.5846/stxb201606291298

曹祥会,龙怀玉,周脚根,朱阿兴,刘宏斌,雷秋良,邱卫文.中温-暖温带表土碳氮磷生态化学计量特征的空间变异性——以河北省为例.生态学报,2017,37(18):6053-6063.

Cao X H, Long H Y, Zhou J G, Zhu A X, Liu H B, Lei Q L, Qiu W W.Spatial variation of ecological stoichiometry characteristics of topsoil carbon, nitrogen and phosphorus in Hebei Province, China. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(18):6053-6063.

中温-暖温带表土碳氮磷生态化学计量特征的空间变 异性

——以河北省为例

曹祥会1,龙怀玉1,周脚根2,朱阿兴3,刘宏斌1,雷秋良1,*,邱卫文4

1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,农业部面源污染控制重点实验室,北京 100081

2 中国科学院亚热带农业生态研究所,长沙 410125

3 中科院地理科学与资源研究所,北京 100101

4 The New Zealand Institute for Plant & Food Research Limited, Private Bag 4704, Christchurch

摘要:解析区域土壤碳氮磷元素的生态化学计量特征的空间分异格局有助于土壤养分的综合管理与利用。运用传统统计学和 地统计学分析方法,以河北省为例分析了中温-暖温带表土(0—30cm)碳氮磷元素的生态化学计量特征的空间变异性及影响因 素。结果显示:(1)土壤有机碳(SOC)、全氮(TSN)、全磷(TSP)其摩尔比率的变异系数均介于 0.1—1 之间,表明其在空间上存 在中等程度的变异性。此外,C:N 的变异系数较小,表明 C:N 较稳定。(2)表土 TSP 和 C:N 具有小范围、强烈的空间自相关 性,SOC、TSN、C:P 和 N:P 具有较大范围、中等程度的空间自相关性,结构性因素是土壤碳氮磷含量及其摩尔比率空间变异的 主要影响因素。从空间分布规律来看,表土碳氮磷含量及其摩尔比率均没有呈现明显的递增或递减的变化规律,SOC、TSN、 C:P和 N:P 具有相同的空间分布趋势,高值区主要分布在囊北地区,分布面积较小,低值区分布范围较广;C:N 的高值区零星 分布在冀北地区,TSP 的高值区和低值区呈现斑块状分布。(3)土壤 C:N、C:P 和 N:P 受到土壤理化性状、土地利用方式、人类 扰动、气候及地形等因素的调控。此外,不同气候带的 C:N、C:P 和 N:P 也存在一定的差异,研究区土壤 C:N 与高寒带较接近, 同时与其他气候带没有显著的差异;C:P 和 N:P 与温带沙漠区较接近,与其余气候带存在显著的差异性,说明不同气候带之间 的 C:N 较 C:P 和 N:P 稳定。

关键词:碳氮磷;生态化学计量;地统计;空间变异

Spatial variation of ecological stoichiometry characteristics of topsoil carbon, nitrogen and phosphorus in Hebei Province, China

CAO Xianghui¹, LONG Huaiyu¹, ZHOU Jiaogen², ZHU Axing³, LIU Hongbin¹, LEI Qiuliang^{1, *}, QIU Weiwen⁴

1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Non-point Pollution Control, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China

2 Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China

Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

4 The New Zealand Institute for Plant & Food Research Limited, Private Bag 4704, Christchurch, New Zealand

Abstract: The study on ecological stoichiometric characteristics of elements in soils is important to revealing mechanisms of the circulation and balance of soil carbon, nitrogen, phosphorus and other elements, and the knowledge of spatial variance

基金项目:国家自然基金(31572208);宁夏回族自治区土系调查与土系志编制(2014FY110200A07);国家留学基金资助

收稿日期:2016-06-29; 网络出版日期:2017-04-25

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: leiqiuliang@ caas.cn

of the ecological stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus is conducive to soil nutrient management. Spatial distributions of stoichiometric characteristics of soil C. N and P in the topsoil (0-30 cm) and influence factors were systematically analyzed in total Hebei Province. Based on the soil survey data in Hebei Province, the traditional statistics, geostatistics and ordinary kriging interpolation method were used to analyze the spatial variation characteristics of C:N:P and its influence factors. The results showed that (1) The variation coefficients of SOC, TSN, TSP and their molar ratios were between 0.1-1, which indicated that there existed spatial variability with a moderate degree. In addition, the variation coefficient of C:N was smaller, which indicated C:N was more stable than N:P and C:P. (2) Topsoil TSP and C: N has a small range and strong spatial autocorrelation, and SOC, TSN, C: P and N: P has a large range and a moderate degree of spatial autocorrelation. Structural factors were main factors of influencing spatial variation of soil organic carbon, nitrogen, phosphorus content and their molar ratio. From the spatial distribution, soil carbon, nitrogen and phosphorus content and its molar ratio did not show obvious increasing or decreasing trend. SOC, TSN, C:P and N:P had the same spatial distribution trend. High value region mainly distributed in the north of Hebei and the distribution area was small. The low value distributed widely in Hebei Province. The high value of TSP distributed in North Hebei, and the high value and low value of C:N showed patch-shape distribution. (3) C:N, C:P and N:P were affected by soil physical and chemical properties, land use patterns, human disturbance, climate and topography so on. In addition, there were some differences between N:P, C:P and C:N in different climate zones. C:N of study region was close to that of and the alpine zone, and there was no significant difference from other climatic zones. C:P and N:P of study region were close to the temperate zone, and there existed significant differences from other climate zones, which indicated that C:N was more stable than C:P and N:P in different climate zones.

Key Words: Carbon, nitrogen and phosphorus; ecological stoichiometry; geostatistics; spatial variation

从分子到生态系统都是元素按照一定比例组成的,生态化学计量学是研究生物系统能量平衡和多重化学 元素(主要是碳、氮、磷)平衡的科学,以及元素平衡对生态交互作用影响的一种理论^[1]。生态化学计量学自 首次被明确为生态研究的一个补充理论以来,国内外学者已经从全球与区域尺度、功能群或生态系统尺度以 及个体水平方面对植物组织的碳氮磷生态化学计量特征开展了相关的研究^[1-3]。

由于土壤作为生态系统的重要组成部分,对植物的生长起着关键性的作用,直接影响着植被群落的组成、 结构与生产力水平,解析土壤元素的生态化学计量特征对揭示土壤化学元素的可获得性、循环和平衡机制以 及生态系统植被养分限制性等具有重要意义^[4-5],因此诸多学者开始对土壤生境的生态化学计量学进行研 究。Cleveland 和 Liptzin^[6]利用 186 个表层土壤的观测数据,探讨了全球林地、草地及其他土壤碳氮磷的生态 化学计量学特征,结果显示:不同植被间土壤 C:N:P 比值存在变异现象,但在点与点之间及大尺度范围内,其 相似性比差异性更明显,土壤 C:N:P 比值有显著的稳定性,其值为 186:13:1。Kirkby 等^[7]研究了澳大利亚 土壤碳氮磷的化学计量学特征,并与其他国家土壤碳氮磷的化学计量学特征进行了比较,也认为土壤腐殖质 的 C:N:P 比值在全球大范围的土壤间是一致的。人类活动对碳氮磷的生态化学计量学特征有重要影响^[4], 许泉等^[8]利用第二次土壤普查数据估算的中国水田和旱地耕层土壤 C:N 的结果为水田(10.8)>旱地(9.9); Li 等^[9]对中国南方亚热带地区不同土地利用条件下土壤碳氮磷的化学计量学特征的研究也表明,土壤 C:N、 C:P 及 N:P 呈水田>旱地或林地的特征;王维奇等^[10]比较不同干扰程度的湿地土壤碳氮磷生态化学计量学 特征的结果表明,土壤 C:N、C:P 和 N:P 均表现出随干扰程度增大而降低的趋势。气候因素对土壤碳氮磷生 态化学计量也有重要影响,Post 等^[11]探讨了土壤 C:N 在 Holdridge 生命带的分布特征,认为 C:N 的高低与气 候关系密切;Tian 等^[12]利用第二次土壤普查的剖面数据,研究了中国不同气候的土壤碳氮磷的生态化学计量 特征,得知中国土壤的 C:N 在不同气候区的变异均较小,而 C:P 和 N:P 的变异均较大。

由于土壤养分具有空间异质性,探讨影响土壤 C、N 和 P 生态化学特征的空间变异因素至关重要。而上

述研究主要是从全球或全国尺度上研究了不同生态系统、不同植被类型及人类干扰等方面的土壤 C、N 和 P 生态化学计量特征,而未对影响C、N和P生态化学计量特征空间变异的影响因子进行深入分析。因此,本文 根据"科技基础性工作专项——土系调查"基础数据,在省域尺度上,首先分析了表土碳氮磷生态化学计量的 空间变异性;其次,从土壤类型、土地利用方式、气候及地形等方面分析了影响碳氮磷生态化学计量的空间变 异性的因子;最后,与其他气候带的异同进行了相关的研究。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区域概况

河北省地处东经113°27′—119°50′、北纬36°05′—42°40′之间。西北环山,东临渤海,东南部是广阔的华 北平原,土地总面积18.88万km²。全省年平均气温9.67℃;年平均降水量536mm,属于典型的中温-暖温带 大陆性季风气候。全省地貌以高原、山地及平原为主,海拔高度呈现从西北向东南逐级下降的趋势。成土母 质主要包括残积物、坡积物以及黄土母质等;植被类型主要有阔叶林和针叶林等;土壤类型主要包括初育土、 人为土、淋溶土、盐碱土、钙层土及水成土等;土地利用类型主要有耕地、林地以及草地等,其中耕地面积为 39.91%、林地为 21.59% 和草地为 4.51%。

1.2 土壤样品采集及测定

依据土壤样点布设要具有代表性、空间分布的均匀性的基本原则、以及研究区域地貌特点、土壤类型以及 土地利用方式,总计布设156个样点(图1)。于2010年8月采集表土(0-30cm)样品,装入自封袋;同时,用 GPS 记录下样点的经纬度和高程,并详细记录采样点周围的景观信息。样品带回实验室后,剔除杂质,经自然 风干后过100目孔筛,以待实验分析。样点的土壤有机碳含量采用浓硫酸-重铬酸钾氧化法、土壤全氮采用凯 氏定氮法和全磷采用钼锑抗比色法[13]。

1.3 数据处理

对观测数据(土壤 C、N 和 P 及其摩尔比率 C:N、C:P 和 N:P),用 SPSS 17.0 统计分析软件进行描述统 计、方差分析(ANOVA)和多重比较(Duncan)等经典统计分析,用GS+9.0软件输出它们的空间结构信息,用 ArcGIS9.3 软件输出它们的普通克里格插值图。

2 结果与分析

2.1 表土碳氮磷含量及其摩尔比率的统计描述

运用 SPSS17.0 对研究区 156 个土壤 C、N、P 及其摩尔比进行经典统计特征分析,结果见表 1。由表 1 可 以看出,没有进行对数转换的 SOC、TSN、TSP 及其摩尔比率的均值和中值差异较大,说明在一定区域内分布 不均匀,易受异常值以及地形等因素的影响。然而,经对数转化后,SOC、TSN和TSP的均值分别为2.46、0.06 和0.11, 中值分别为2.38、0.05和0.10;C:N、C:P和N:P的均值分别为2.57、3.31和0.75, 中值为2.56、

	/	Table 1	Statistics ch	aracters of C	C, N, P and	their mole rat	io		
项目		纺	芒计值/Statisti	cs		变异系数	偏度	峰度	V SD
Item	最小值	最大值	均值	中值	标准差	C.V	Skew.	Kur.	K-SP
SOC/(g/kg)	2.38	62.21	15.43	10.77	12.02	0.77	1.43	4.72	0.000
TSN/(g/kg)	0.26	3.97	1.29	0.98	0.81	0.62	1.10	3.49	0.002
TSP/(g/kg)	0.25	2.84	1.23	1.10	0.51	0.41	0.47	2.70	0.019
C:N	6.62	42.27	13.57	13.16	4.61	0.34	0.38	4.21	0.002
C:P	5.69	183.89	35.77	25.06	30.61	0.86	0.37	2.70	0.000
N:P	0.39	12.55	2.61	1.95	1.96	0.75	0.30	2.91	0.000

表1 土壤 C、N、P 及其摩尔比率的描述统计特征值

SOC 指土壤有机碳,TSN 指土壤全氮,TSP 指土壤全磷,C:N:P 指 SOC:TSN:TSP 的摩尔比率



图 1 河北省样点空间分布图、土地利用类型图、地形图、土壤图和气候带区划图 Fig.1 Spatial distribution of the samplers, land-use type, terrain, soil and temperature zoning maps in Hebei Province

3.22 和 0.68, 土壤 SOC、TSN、TSP 及其摩尔比率的均值和中值较接近, 且中值均小于均值, 这说明经对数转换 后, 减小了异常值以及地形等因素的影响, 其分布比较均匀。土壤 SOC、TSN、TSP 及其摩尔比率的变异系数 分别为介于 0.1—1 之间, 按照变异系数的划分等级:弱变异性, C.V< 0.1; 中等变异性, C.V= 0.1—1.0; 强变 异性, C.V> 1.0^[14], 土壤 SOC、TSN、TSP 及其摩尔比率在空间上存在中等程度的变异性。

鉴于经典统计描述分析只能概括研究区 SOC、TSN、TSP 及其摩尔比率分布特征的全貌,在一定程度上反映样本全体,没能定量地刻画其随机性和结构性、独立性和相关性。因此,进一步采用地统计方法进行土壤有机碳和全氮的空间变异结构分析。

数据的正态分布性是使用地统计学方法进行土壤特性空间分析的前提。由表 1 可知,没有进行对数转换的 SOC、TSN、TSP 及其摩尔比率经 K-S 检验(α=0.05),均不符合正态分布。然而,经过对数转换后,SOC、TSN、TSP 及其摩尔比率的 K-SP 值分别为 0.589、0.747、0.106、0.216、0.505 和 0.447,均符合正态分布。因此,

A

研究区经对数转换后的土壤 SOC、TSN、TSP 及其摩尔比率均满足地统计分析的假设条件。 2.2 表土碳氮磷含量及其摩尔比率的空间结构分析

表土碳氮磷含量及其摩尔比率是基于半方差函数模型的选择,采用 GS+9.0 对碳氮磷含量及其摩尔比率 进行分析,比较不同模型产生的块金值、基台值、块金值/基台值和决定系数等相关参数。在这几个参数中,首 先要考虑的是决定系数,其次考虑块金值的大小。决定系数较大表明半方差函数理论模型的拟合效果较好。 根据这个原则,选择高斯模型作为 SOC、TSN 和 C:N 的最优半方差函数拟合模型,指数模型作为 C:P 的最优 半方差函数拟合模型,球状模型作为 TSP 和 N:P 的最优半方差函数拟合模型(表 2)。土壤碳氮磷含量及其 摩尔比率的空间分异性是结构性因素和随机性因素共同作用的结果。结构性因素,如气候、母质、地形、土壤 类型等可以导致土壤养分强的空间相关性,而随机性因素如施肥、耕作措施、种植制度等各种人为活动使得土 壤养分的空间相关性减弱,朝均一化方向发展。在半方差函数模型中,块金值/基台值(块金系数)表示空间 变异性程度,该比值越小,表明由结构性因素引起的空间变异性程度较大;反之,表明由随机部分引起的空间 变异性程度较大^[15-16]。由表 2 可以看出,土壤 TSP 和 C:N 的块金值/基台值分别为 5.4% 和 18.8% (均小于 25%),且其变程分别为 23km 和 22km;SOC、TSN、C:P 和 N:P 的块金值/基台值分别为 37.6%、37.1%、49.9% 和 47.0% (介于 25%—75%),且其变程分别为 64、72、205、140 km,表明 TSP 和 C:N 具有小范围、强烈的空间 自相关性,SOC、TSN、C:P 和 N:P 具有较大范围、中等程度的空间自相关性。另外,结构性因素是土壤碳氮磷 含量及其摩尔比率空间变异的主要影响因素。

表 2 土壤碳、氮、磷及其摩尔比的变异函数理论模型及相关参数 Semi-variogram model and its relevant parameters of soil C N and P and th

	Table 2 Selli-Va	in logi ann mouer and	i its relevant par	affecters of soli C, F	allu i allu tileli at	
项目 Item	模型 Model	块金值 Nugget	基台值 Sill	变程 Range/km	$C_0/(C_0+C)$	决定系数(R ²) Determination coefficient
SOC	高斯 Gussian	0.201	0.535	64	0.376	0.769
TSN	高斯 Gussian	0.143	0.382	72	0.371	0.793
TSP	球状 Spherical	0.011	0.212	23	0.054	0.263
C:N	高斯 Gussian	0.018	0.093	22	0.188	0.722
C : P	指数 Exponential	0.274	0.549	205	0.499	0.654
N :P	球状 Spherical	0.206	0.437	140	0.470	0.578

2.3 表土碳氮磷含量及其摩尔比率的空间分布规律

对表土碳氮磷含量及其摩尔比率进行普通克里格插值(图 2)。独立验证结果表明(表 3),SOC、TSN、TSP、C:N、C:P和N:P的测定值与预测值显著相关,且ME和RMSE较小。可见,利用克里格插值法的空间插值结果相对可靠。

		表 3 插值结果的精度统计检验					
		Tat	ole 3 Precise statistics	verification of	interpolation		
指标	平均误差	均方根误差	相关系数(R ²)	指标	平均误差	均方根误差	相关系数(R ²)
Index	ME	RMSE	Correlation coefficient	Index	ME	RMSE	Correlation coefficient
SOC	0.03	4.65	0.595	C :N	-0.21	0.55	0.985
TSN	0.06	0.56	0.582	C : P	0.02	14.17	0.644
TSP	0.01	0.01	0.984	N : P	0.47	2.03	0.568

从空间分布规律来看,表土碳氮磷含量及其摩尔比率均没有呈现明显的递增或递减的变化规律,SOC、 TSN、C:P和N:P具有相同的空间分布趋势,高含量区主要分布在北部地势相对较高的林地(承德、保定及张 家口部分地区),而低含量区则主要出现在南部地势较低的农业用地区域(邢台、沧州、石家庄、张家口及唐山 等地区)。土壤TSP的高值区主要分布在张家口、唐山、秦皇岛等地区,分布面积较小,其值范围为1.322.84;低值区分布于邢台、保定及承德等地区,分布面积较小,其值范围为0.25—0.91。土壤C:N高值区零星分布在承德、张家口及唐山等地区,分布面积较小,其值范围为27.95—42.27;低值区分布于整个研究区,其值范围为6.62—13.33。此外,由表1可知,土壤C:N在整个研究区的变异系数为0.34,说明C:N在该研究区的空间分布较为稳定,这主要是由于土壤全氮和有机碳的空间分布具有一致性,因此导致土壤的C:N比在整个空间内较为稳定。



Fig.2 Spatial distribution of topsoil C, N, P and their atomic ratio

2.4 表土碳氮磷摩尔比率的空间分异的影响因素

2.4.1 土壤特性对土壤 C:N、C:P 和 N:P 的影响

根据中国土壤发生分类的标准,本研究区土壤类型主要可以划分为6大土纲,不同土纲的C:N、C:P和N:P均值存在一定的差异(表4)。C:N均值的大小顺序为:初育土(14.87)>水成土(13.96)>盐碱土(13.38)> 钙层土(13.21)>淋溶土(12.81)>人为土(10.82),人为土除与淋溶土差异不显著外,与其余4种土壤均存在显 著性差异(P<0.05);C:P均值的大小顺序:初育土(47.69)>淋溶土(35.97)>钙层土(31.57)>水成土(31.49) >盐碱土(24.44)>人为土(15.44),人为土除与盐碱土差异不显著外,与其余四种土壤均存在显著性差异(P<0.05);N:P均值的大小顺序:初育土(3.34)>淋溶土(2.77)>钙层土(2.34)>水成土(2.17)>盐碱土(1.91)>人为土(1.45),人为土除与盐碱土差异不显著外,与其余四种土壤均存在显著性差异(P<0.05)。由以上分析可知,人为土的C:N、C:P和N:P较其他土壤小,且变异程度也较小。

根据美国农部制分级标准(USDA,1952),本研究区可以划分出3种类型的土壤质地,不同土壤质地的C:N、C:P和N:P均值也表现不同(表4)。一般认为,土壤质地主要影响土壤水分有效性、植被生长及黏粉 粒对有机碳的吸附,从而影响土壤C:N、C:P和N:P。C:N、C:P和N:P的均值大小顺序均为:砂土>壤土> 黏壤土,C:N和N:P均值的差异性不显著(P<0.05),砂土的C:P与壤土和黏壤土的差异性较显著(P<0.05)。

此外, 土壤 C:N、C:P 和 N:P 还受到土壤理化性状的影响^[10]。土壤 C:N、C:P、N:P 除受到各自比例元 素的影响外, 同时还受到土壤 pH、容重等因子的调控。由表 5 可知, 除 C:N 与磷含量的相关性不显著, 而土 壤 C:P 和 N:P 分别与氮和碳含量的相关性显著, 这主要是因为碳与氮具有显著的相关性; 土壤 pH 对 C:N、 C:P和 N:P 的影响较小, 相关性不显著(α=0.05); 而容重与 C:N、C:P 和 N:P 均存在极显著相关关系。

	Table 4	Comparison of soil C :N,C :P	和 N :P relative to soil	type and soil texture	
		样点数		指标 Index	
		Number of sample	C : N	C : P	N :P
土纲 Soil order	盐碱土	5	13.38 а	24.44 ab	1.91 ab
	初育土	39	14.87 a	47.69 a	3.34 a
	水成土	35	13.96-a	31.49 a	2.17 a
	人为土	8	10.82 b	15.44 b	1.45 b
	钙层土	16	13.21 a	31.57 a	2.34 a
	淋溶土	53	12.91 ab	35.97 a	2.77 а
土壤质地	砂土类	9	14.91 a	53.40 a	3.57 a
Soil texture	壤土类	119	13.50 a	36.27 b	2.68 a
	黏壤土类	28	13.44 a	29.39 b	2.17 a

表 4 不同土壤类型和土壤质地的 C:N、C:P 和 N:P 比较

司一列数据小写字母表示差异显著(P<0.05)

0 559*

N :P

表 5 C:N、C:P及N:P与影响因子间的相关关系

Correlation between C :N. C :P and N :P ratios and influencing factors

0.241

0.575*

0.294

0.298 *

	- 90		seconden e rige	unu :: 1 :uu	os ana initiatineng i		
指标 Index	碳含量 Carbon	氮含量 Nitrogen	磷含量 Phosphorus	pH	容重 Bulk density	海拔 Latitude	坡度 Slope
C :N	• - \	_	0.173	0.177	0.507 **	0.176 *	0.090
C : P	_	0.666 **	_	0.279	0.723 **	0.345 *	0.270 *

*显著相关(P<0.05);**显著相关(P<0.01);一存在自相关关系,不宜进行相关分析

2.4.2 不同土地利用类型对土壤 C:N、C:P 和 N:P 的影响

不同土地利用方式下的土壤元素影响因子差异不同(表 6),主要是因为不同的土地利用方式有不同的植被覆盖,从而导致 C、N 和 P 进入土壤的方式也有所不同。不同土地利用类型下 C:N 大小顺序为:沼泽地(21.15)>草地(14.62)>林地(13.39)>盐碱地(13.38)>耕地(11.81),且沼泽地的 C:N 与其他四种土地利用类型的差异显著(P<0.05);C:P 的大小顺序为:沼泽地(49.84)>草地(48.18)>林地(39.84)>盐碱地(24.44)>耕地(18.32),且耕地与盐碱地差异不显著,而与草地、林地及沼泽地的差异显著(P<0.05);N:P 的大小顺序为: 草地(3.34)>林地(3.05)>沼泽地(2.16)>盐碱地(1.91)>耕地(1.59),且耕地与沼泽地和盐碱地差异不显著, 而与草地及林地的差异显著(P<0.05)。

	表 6 不同土地利	用奕型 C:N、C:P 和 N	:P 比较	
	Table 6 Comparison of soil	C:N, C:P and N:P in	land-use type soil	
土地利用类型	样点数		指标 Index	
Land-use type	Number of sample	C:N	C : P	N:P
耕地 Arable land	50	11.81 с	18.32 b	1.59 b
草地 Grassland	62	14.62 b	48.18 a	3.34 a
林地 Forestland	35	13.39 bc	39.84 a	3.05 a
沼泽地 Wetland	4	21.15 a	49.84 a	2.16 ab
盐碱地 Saline-alkali land	5	13.38 bc	24.44 ab	1.91 ab

同一列数据小写字母表示差异显著(P<0.05)

2.4.3 气温、降水量和地形对土壤 C:N、C:P 和 N:P 的影响

由图 3 可以看出,本研究区中温带和暖温带的 C: N、C:P和N:P存在一定的差异,中温带的土壤 C:N、 C:P和N:P均值分别为 13.83、33.51和 2.91;暖温带的 土壤 C:N、C:P和N:P均值分别为 13.27、30.78和 2.32。中温带和暖温带的土壤 C:N、C:P和N:P在α= 0.05水平经独立样本 t检验,其 P值分别为 0.444、 0.045和 0.068,其中只有 C:P的 P值小于 0.05,说明中 温带和暖温带的 C:P在α=0.05水平上差异显著,而 C:N和N:P差异不显著。由以上分析可以看出,中温 带的土壤 C:N、C:P和N:P均大于暖温带的土壤 C:N、 C:P和N:P,这主要是由于中温带地区的气温较暖温 带低,而降水量高于暖温带,C:N、C:P和N:P与气温 呈现极显著的负相关性(P<0.01),而与降水量呈现较 显著的正相关性(P<0.05)(表7)。由表5可知,除C:N





与坡度相关性不显著外,C:N、C:P和N:P与海拔、坡度的相关性均较显著(P<0.05)。

Table 7 Correlation between C:N, C:P and N:P ratios and temperature and precipitation							
		C :	N	С:	Р	Ν	:Р
		气温	降水量	气温	降水量	气温	降水量
中温带		-0.427 **	0.266 *	-0.379 **	0.237 *	-0.267 *	0.232 *
暖温带		-0.617 **	0.263 *	-0.519 **	0.245 *	-0.473 **	0.284 *
	V. (D. C. C.T.)	日世旧社(日本					

₹ C:N、C:P及N:P与气温和降水量的相关关系

显著相关(P<0.05);**显著相关(P<0.01)

3 讨论

3.1 碳、氮、磷生态化学计量特征的空间格局规律及影响因子分析

该研究区土壤碳、氮、磷空间分布结果表明,土壤 SOC 和 TSN 具有较大尺度的、中等程度的空间自相关 性,表明两者的空间分布特征受地形、施肥、土地利用等因素影响,这与前人研究结果基本一致^[17-18]。有关研 究表明,不同土地利用之间土壤 SOC、TSN 和 TSP 含量差异显著,而总体上 SOC、TSN 与坡度之间相关性显 著^[19]。这表明土壤 SOC 和 TSN 含量变化不仅受到施肥、耕作等人为因素的影响,还受到生物固定碳氮、大气 碳氮沉降和凋落物归还等自然因素的限制^[20-21]。综上所述,土壤 SOC 和 TSN 的空间变异可能受到地形起伏、 土地利用类型和施肥等因素影响。研究区 TSP 的空间分布特征恰好与 SOC 和 TSN 相反,具有小尺度范围的、 高等程度的空间自相关性。土壤磷素的主要来源为人为施肥导致的累积,同时相比土壤碳氮元素,土壤磷素

6061

不易发生迁移[22-23]。

研究结果表明,表土碳氮磷摩尔比率均没有呈现明显的递增或递减的变化规律,这种空间分布格局主要 可能是与该研究区的气候、植物生产力、土地利用状况以及人类活动干扰等因素有关^[24]。但是 C:N 在该研 究区的空间分布较为稳定,Tian 等^[12]在对全国土壤 C:N:P 比的研究中也指出,虽然碳和氮含量具有较大的 空间变异性,但 C:N 比相对稳定,受气候的影响很小。土壤 C:N 在整个研究区变化差异不明显,主要是因为 碳、氮元素之间联系较紧密且对环境变化的响应几乎是同步的,这在 Cleveland 等^[6]的研究中也有体现,同时 碳和氮作为结构性成分,其积累与消耗过程存在相对固定的比值。土壤 C:P 与 N:P 的变化,可认为是随着 干扰程度的增大,土壤碳含量和氮含量的损失较快,磷含量的改变则滞后于碳和氮,具有相对稳定性^[6]。

氮磷养分的有效性是调节植物凋落物分解速率和生态系统碳平衡的一个主要因素,碳积累速率和存储能力是与限制植物生长的氮和磷的供应有关^[4]。研究结果表明,其中土壤 SOC 与 TSN 和 C:P 与 N:P 之间显著相关,这与前人的研究结果基本一致^[9-10]。同时,研究区不同土壤类型的 C:N、C:P 和 N:P 存在一定的差异,其中人为土的 C:N、C:P 和 N:P 较盐碱土、初育土、水成土、钙层土及淋溶土小;不同土地利用类型的 C:N、C:P和 N:P 研究表明,耕地与沼泽地和盐碱地差异不显著,而与草地及林地的差异显著,欧阳林梅等^[25] 对比了耕地土壤 C:N、C:P 和 N:P 与其它类型土壤的异同,主要表现为耕地土壤 C:N 与全球草地、森林及中国陆地平均值差别不大,表现出一定的稳定性,而 C:P、N:P 则在土地利用方式下有所差异,这与本文研究略有差异,本研究区的耕地土壤 C:N 与草地差异显著,而与林地无显著差异。主要是因为一般非人类扰动的生态系统,由于高的有机物质自然归还而没有 N、P 外源输入(除 N 干湿沉降外),C:N、C:P 和 N:P 的值高于人类扰动的生态系统。由此可见,人类活动的干扰对土壤碳、氮、磷元素的储量及循环过程有着深刻地影响,相应的元素比也将发生变化^[26]。土壤 C:N 与 C:P 随着干扰程度的增大而降低,一方面是因为随着干扰程度的增大(如翻耕等)导致碳损失速率高于氮;另一方面可能是人为施肥导致土壤中 N、P 的含量增加。

不同气候带的气候状况存在一定的差异,气候主要是通过气温和降水量等条件的变化,影响植物根系和 微生物对土壤养分的分解^[27-28]。温度、湿度适宜,土壤植物根系愈发达,微生物活性较强,枯枝落叶分易于分 解,有利于土壤有机碳的累积。地形主要影响养分的流失状况,坡度较大的地区易造成土壤中碳、氮和磷的流 失,从而影响 C:N、C:P 和 N:P 比值。有关研究表明土壤固碳机制主要包括黏粒保护理论、团聚体保护理论 及植物-微生物保护机制,土壤氮素主要通过径流携带进入水体,土壤中磷素多以不溶态的土壤结合物形式 存在,坡地磷素多以泥沙吸附态形式发生流失,相对而言,氮的流失速率最大,磷次之,碳最小^[29-32]。海拔对 C:N、C:P 和 N:P 也有一定的影响,一方面使植被生产力不同而使植物残体的形成量和碳、氮的输入不同,另 一方面也使气候要素和土壤性质不同而致使土壤碳和氮的分解、矿化和淋溶等过程不同。

3.2 不同气候带土壤 C:N, C:P 和 N:P 的比较

对比中国其他气候带可以发现(表8),研究区土壤C:N与高寒带较接近,同时与其他气候带没有显著的 差异,但纬度越高,则C:N越大。相关研究表明在热带和亚热带地区有较多的植被凋落物,与寒冷地区相比, 热带和亚热带地区的凋落物降解速率快,C:N较低^[11];C:P和N:P与温带沙漠区较接近,与其余气候存在显 著的差异性(P<0.05)。土壤C:N、C:P和N:P反映极端气候对土壤养分平衡的影响,热带及亚热带地区的 高温及强降水量导致大量的P淋溶损失;此外,热带及亚热带系统具有较强的生产力,可以保持土壤具有较 高的碳和氮含量,从而使土壤具有较高的C:P和N:P^[33]。相比之下,寒冷干燥地区的植被生产力较低,土壤 中含有较低的碳和氮含量,同时P的淋溶损失也较低,从而使使土壤具有较低的C:P和N:P。在温带沙漠地 区,降水量少导致土壤湿度低,植被具有较低的生产力及养分淋溶弱,因而植被吸收氮的能力下降以及碳的输 入量也降低,同时P的淋溶损失也较低,从而无机氮在土壤中大量积累,具有较低的C:N和C:P。从表8可 以看出,温带沙漠地区的N:P最低,有研究表明全球表层土壤(0—10cm)的N:P为13.1^[34],这明显高于中国 不同气候带的土壤N:P。

关于中国不同气候带的土壤 C:N, C:P 和 N:P 相关研究较少。由于不同的土地利用、土壤的发育阶段、

气候、地形、生态系统、植被及样点的个数等差异,造成了不同气候带土壤 C : N , C : P 和 N : P 的复杂性和不确 定性。因此,有待进一步研究以更准确评估土壤C:N,C:P和N:P。

		iu N · I ili ullerent clilla	ate zones in China	
气候带 Climate zone	样点数 Number	C :N	C : P	N : P
高寒带 Frigid highland	749	13.6±1.1a	62±3.0b	5.9±0.7ab
温带沙漠 Temperate desert	319	12.2±0.2a	32±2.1c	2.6±0.1c
寒温带 Cool temperate zone	378	12.4±0.2a	74±6.0a	5.4±0.3b
热带 Tropical zone	2071	12.1±0.1a	78±2.1a	6.4±0.2a
同一列粉捉小官字母丰云差导	与显茎(P>0.05)			

表 8 中国不同气候带的土壤 C:N, C:P 和 N:P^[35]

Table 8 Soil C 'N C 'P and N 'P in different climate zones in China

·列数据小写字母表示差异显著(P<0.0

结论 4

(1) 土壤 SOC、TSN、TSP 及其摩尔比率的变异系数分别为介于 0.1—1 之间,表明其在空间上存在中等程 度的变异性。此外,C:N的变异系数较小,C:N较C:P和N:P稳定。

(2) 表土 TSP 和 C:N 具有小范围、强烈的空间自相关性,SOC、TSN、C:P 和 N:P 具有较大范围、中等程 度的空间自相关性,结构性因素是土壤碳氮磷含量及其摩尔比率空间变异的主要影响因素。从空间分布规律 来看,表土碳氮磷含量及其摩尔比率均没有呈现明显的递增或递减的变化规律,SOC、TSN、C:P和N:P具有 相同的空间分布趋势,高值区主要分布在冀北地区,分布面积较小,低值区分布范围较广;C:N的高值区零星 分布在冀北地区,TSP的高值区和低值区呈现斑块状分布。

(3) 土壤 C:N、C:P 和 N:P 受到土壤理化性状、土地利用方式、人类扰动、气候及地形等因素的调控,这 些因素不是独立起作用,土壤C:N、C:P和N:P是这些因子综合作用的结果。不同气候带的C:N、C:P和N: P也存在一定的差异,研究区土壤C:N与高寒带较接近,同时与其他气候带没有显著的差异;C:P和N:P与 温带沙漠区较接近,与其余气候带存在显著的差异性,说明不同气候带之间的C:N较C:P和N:P稳定。

参考文献(References):

- [1] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, Fagan W F, Markou T A, Cotnor J B, Weider L J. Biological stoichiometry from genes to ecosystems. Ecology Letters, 2000, 3(6): 540-550.
- [2] Redfield A C. The biological control of chemical factors in the environment. American Scientist, 1958, 46(3): 205-221.
- [3] 曾冬萍,蒋利玲,曾从盛,王维奇,王纯.生态化学计量学特征及其应用研究进展.生态学报,2013,33(18):5484-5492.
- [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] Zeng D H, Chen G S. Ecological stoichiometry: a science to explore the complexity of living systems. Acta Phytoecologica Sinica, 2005, 29: 1007-1019.
- Cleveland C. C., Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil; is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass?. Biogeochemistry, 2007, 85; [6] 235-252.
- [7] Kirkby C A, Kirkegaard J A, Richardson A E, et al. Stable soil organic matter: A comparison of C:N:P:S ratios in Australian and other world soils. Geoderma, 2011, 163:197-208.
- ,许泉,芮雯奕,刘家龙,刘智,杨玲,尹宇静,张卫建.我国农田土壤碳氮耦合特征的区域差异.生态与农村环境学报,2006,22(3):57-60.
- [9] Li Y, Wu J S, Liu S L, Shen J L, Huang D Y, Su Y R, Wei W X, Syers J K. Is the C:N:P stoichiometry in soil and soil microbial biomass related to the landscape and land use in southern subtropical China?. Global Biogeochemical Cycles, 2012, 26 (GB4002):14.
- [10] 王维奇,曾从盛,钟春棋, 仝川. 人类干扰对闽江河口湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征的影响. 环境科学, 2010, 31 (10): 2412-2416.
- [11] Post W M, Pastor J, Zinke P J, Stangenberger A G. Global patterns of soil nitrogen storage. Nature, 1985, 317: 613-616.
- [12] Tian H, Chen G, Zhang C, Melillo J M, Hall C S. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: A synthesis of observational data. Biogeochemistry, 2010, 98:139-151.

6063

[13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.

18 期

- [14] 雷志栋,杨诗秀,许志荣,G.瓦肖尔.土壤特性空间变异性初步研究.水利学报,1985,35(9):10-21.
- [15] 路鹏, 彭佩钦, 宋变兰, 唐国勇, 邹焱, 黄道友, 肖和艾, 吴金水, 苏以荣. 洞庭湖平原区土壤全磷含量地统计学和 GIS 分析. 中国农业 科学, 2005, 38(6):1204-1212.
- [16] 刘杏梅,徐建民,章明奎,史舟,施加春.太湖流域土壤养分空间变异特征分析—以浙江省平湖市为例.浙江大学学报,2003,29(1): 76-82.
- [17] 郭旭东,傅伯杰,马克明,陈利顶,杨福林.基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究——以河北省遵化市为例.应用生态学报,2000,11(4):557-563.
- [18] Robertson G P, Crum J R, Ellis B G. The spatial variability of soil resources following long-term disturbance. Oecologia, 1993, 96: 451-456.
- [19] 杨文,周脚根,王美慧,韩增,张满意,李裕元,吕殿青,吴金水.亚热带丘陵小流域土壤碳氮磷生态计量特征的空间分异性. 土壤学报 2015,52(6):1336-1344.
- [20] 曹丽花,赵世伟.土壤有机碳库的影响因素及调控措施研究进展.西北农林科技大学学报(自然科学版),2007,35(3);177-187.
- [21] 王敬,李贤伟,荣丽,李德会,谢娟.森林土壤氮贮量及氮素输入过程研究进展.世界林业研究,2008,21(1):14-19.
- [22] Qin H L, Quan Z, Liu X L, Li M D, Zong Y, Wu J S, Wei W X. Phosphorus status and risk of phosphate leaching loss from vegetable soils of different planting years in suburbs of Changsha, China. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 9: 1641-1649.
- [23] 金慧龙,李裕元,高茹,刘新亮,吴金水.亚热带小流域土壤氮磷分布及其环境效应.水土保持学报,2012,26(3):123-126.
- [24] 门明新,彭正萍,刘云慧,宇振荣. 基于 SOTER 的河北省土壤有机碳、氮密度的空间分布,土壤通报, 2005, 36(4):469-473.
- [25] 欧阳林梅,曾冬萍,闵庆文,王维奇, 仝川. 鼓山茶园土壤碳氮磷生态化学计量学特征. 水土保持学报, 2014, 28(2): 298-312.
- [26] 辛艳,王瑄,邱野,李德利,赵倩,辽宁省不同耕作方式对坡耕地水土及氮磷养分流失的影响效果.水土保持学报, 2013, 27(1):27-31.
- [27] 刘国华,傅伯杰,吴钢,段桂兰.环渤海地区土壤有机碳库及其空间分布格局的研究、应用生态学报,2003,14(9):1489-1493.
- [28] Oleksyn J, Reich P B, Zytkowiak R, Karolewski P, Tjoelker M G. Nutrient conservation increases with latitude of origin in European Pinus sylvestris populations. Oecologia, 2003, 136:220-235.
- [29] Eusterhues K, Rumpel C, Kogel-Knabner I. Organo-mineral associations in sandy acid forest restoration of degraded Cunninghamia lanceolata plantation soil. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 11: 191-196.
- [30] Mikutta R, Kleber M, Torn M S. Stabilization of soil organic matter: association with minerals or chemical recalcitrance?. Biogeochemistry, 2006, 77; 25-56.
- [31] Zhao F Z, Chen S F, Han X H, Yang G H, Feng X Z, Ren G X. Policy-guided nationwide ecological recovery: soil carbon sequestration changes associated with the Grain-to-Green Program in China. Soil science, 2013, 10:550-555.
- [32] 徐畅,谢德体,高明,陶春,余泺. 三峡库区小流域旱坡地氮磷流失特征研究. 水土保持学报, 2011, 25(1):1-10.
- [33] Zhang C, Tian H Q, Liu J, Wang S Q, Liu M L, Pan S F, Shi X Z. Pools and distributions of soil phosphorus in China. Global Biogeochemical Cycles, 2005, 19:GB1020.
- [34] Cleveland C C, Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? Biogeochemistry, 2007, 85: 235-252.
- [35] Tian H Q, Chen G S, Zhang C. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data. Biogeochemistry, 2010, 98:139-151.