

DOI: 10.11766/trxb201412010607

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*

杨文^{1,2} 周脚根¹ 王美慧¹ 韩增¹ 张满意¹
李裕元^{1†} 吕殿青^{2†} 吴金水¹

(1 亚热带农业生态过程重点实验室(中国科学院亚热带农业生态研究所), 长沙 410125)

(2 湖南师范大学资源与环境科学学院, 长沙 410081)

摘要 理解土壤碳氮磷生态化学计量特征的空间变异有助于土壤养分管理。以湖南省长沙县金井镇脱甲河小流域(52 km²)为研究区,系统分析了亚热带丘陵小流域表层(0~20 cm)土壤碳氮磷的生态化学计量特征及其空间变异性。该流域土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)和全磷(TP)平均含量分别为13.09、1.50和0.51 g kg⁻¹, C:N、C:P和N:P平均值分别为10.42、72.71和7.19,均具有高等变异水平和中等程度的空间自相关性。土壤C:N、C:P、N:P高值区域主要分布在海拔高、人为干扰少和肥料使用少的林地区,而低值区主要分布在海拔较低、人类活动频繁以及化肥施用量的农田区。菜地、茶园、林地和稻田等不同土地利用方式下,土壤C:N:P差异显著;在高海拔和陡坡地区,土壤C:N:P均明显偏高。这表明研究区域表层土壤碳氮磷比率的空间分异与土地管理措施和地形有着密切的关系。

关键词 碳;氮;磷;生态化学计量;空间分异;亚热带丘陵小流域

中图分类号 S158.3 **文献标识码** A

土壤作为生态系统的重要组成部分,研究土壤元素的生态化学计量特征对揭示土壤碳、氮、磷等元素循环和平衡机制具有重要意义^[1-2]。生态化学计量学在土壤养分循环与限制作用研究中的应用引发了广泛的关注^[3-4]。Cleveland和Liptzin^[5]从全球尺度上研究了土壤碳氮磷的化学计量特征,结果显示:土壤C:N:P原子数比为186:13:1,且在不同植被类型土壤之间存在着显著的差异,比如森林土壤C:N:P原子数比(212:15:1)要远高于草地(166:12:1)。Tian等^[3]研究发现,中国9个土纲的C:N:P比率受到气候、地貌和植被等土壤形成因子和人类活动的影响;并且土壤碳氮磷总量变化很大,使得土壤C:N:P比率

的空间变异性较大,从最低干旱土(干漠土、旱境土)的29.0:2.6:1到最高有机土(黑纡土)的340:17.77:1。中国亚热带地区的喀斯特山地、低山和低地三种景观土壤碳氮磷原子数比率呈降低趋势,而在林地、旱地和稻田三种土地利用类型中,林地与旱地土壤C:N:P基本相等,分别为56:5.9:1和56.7:5.9:1,均低于稻田土壤的101.2:10:1,主要原因在于海拔高度、植被类型和田间管理的差异^[4]。可见,土壤性质、土地利用类型或者管理措施的差异同样影响土壤碳氮磷的生态化学计量特征。

小流域作为中国南方丘陵区最基本的地形地貌单元,具有基本相似的土地利用格局:林地、果

* 国家自然科学基金项目(41171396, 41201299)、湖南省“十二五”重点学科建设项目(地理学:2012001)和国家科技支撑计划项目(2014BAD14B02)资助。

† 通讯作者, E-mail: liyy@isa.ac.cn; ldianqing@163.com

作者简介: 杨文(1990—), 女, 湖南娄底人, 硕士研究生, 主要研究土壤氮磷的空间分布特征。E-mail: 813677012@qq.com

收稿日期: 2014-12-01; 收到修改稿日期: 2015-04-21

园、茶园和旱地等为丘岗区主要的土地利用方式，而水田、菜地、堰塘、建设用地等集中在沟谷区。本文选择典型亚热带丘陵区脱甲河小流域为研究区域，研究小流域尺度下土壤C、N、P及其生态计量特征的空间格局，探讨土壤碳氮磷计量特征与土地利用类型和地貌的关系，为土壤养分的科学管理提供依据和数据基础。

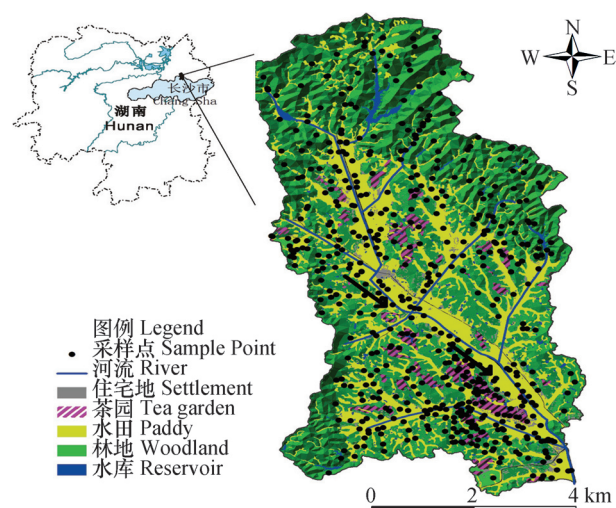
1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区脱甲河小流域位于湖南省长沙县东北部的金井镇境内，地理坐标为 $27^{\circ}55' \sim 28^{\circ}40' N$ ， $112^{\circ}56' \sim 113^{\circ}30' E$ ，流域面积 52 km^2 （图1），属中亚热带湿润季风区。研究区属典型的红壤丘陵地貌，地形总体上呈北高南低；海拔为 $56.0 \sim 434.8 \text{ m}$ ，其中海拔 200 m 以下为主体，占区域的 89.3% ，而 300 m 以上仅占 1.5% ；土壤类型主要以红壤和水稻土等两种类型为主。流域内林地是主要土地利用方式，面积比例占 58.5% ；农用地比例较低，其中水田和茶园分别占 31.6% 和 4.3% ，而菜地极少且零星分布居民点周边。

1.2 样品采集与分析

于2009年11—12月，按土地利用类型和地形地貌特征在研究区采集表层（ $0 \sim 20 \text{ cm}$ ）土壤样品548个，并记录样点的GPS坐标以及土地利用类



注：图中黑色箭头代表河流流向 Note: The black arrow in the figure stands for river

图1 脱甲河小流域土地利用类型及样点空间分布图
Fig. 1 Spatial distribution of land use types and sampling points in the small watershed

型，布点密度约为 10 个点 km^{-2} 。样点的空间布局见图1。样品经室内处理后，用于分析土壤理化性质，包括土壤有机碳（Soil Organic Carbon, SOC）、全氮（Total Nitrogen, TN）及全磷（Total Phosphorus, TP）。

土壤有机碳采用高温灼烧和气相色谱相结合的Vario MAX 碳/氮元素分析仪进行测定；全氮采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{MnO}_4$ 消煮制备待测液及采用Vario MAX 碳/氮元素分析仪进行测定；全磷采用 NaOH 熔融法—钼锑抗比色法测定。具体方法参考土壤农化分析^[6]。

1.3 数据处理

对采样点的观测数据进行整理并剔除少数异常点后，获得529个有效的观测样点，菜地样本21个，茶园64个，稻田262个，林地182个。SPSS18.0软件用于描述统计、方差分析（ANOVA）和多重比较（Duncan）等经典统计分析，SigmaPlot 12.5软件输出回归拟合图。基于GS+Version9软件得到土壤C：N：P的空间结构信息，ArcGIS9.3软件得到土壤有机碳、全氮、全磷含量及其原子数比（无量纲）的普通克里格插值图。

2 结果

2.1 小流域表层土壤碳、氮、磷含量及C：N：P的统计特征

对脱甲河小流域内土壤碳氮磷含量及其原子数比进行统计分析，结果见表1。流域土壤SOC、TNTN、TP含量（ g kg^{-1} ）的平均含量分别为13.01、1.48和0.50，变异系数均高于 36% ^[7]，达到高等变异水平^[3]。相关分析显示，SOC与TNTN之间存在线性关系，相关系数为0.69（ $p < 0.01$ ）；而SOC和TP、TNTN和TP之间存在正相关，相关系数分别为0.56和0.53（ $p < 0.01$ ）。

土壤C：N、C：P及N：P原子数平均值为10.43、72.13和7.14，其中C：N的变异系数为 35.6% ，达到中等程度的变异水平，而C：P、N：P变异系数为 46.0% 和 37.0% ，达到高等变异水平。此外，C：N和C：P、C：P与N：P之间存在线性关系，相关系数分别为0.54和0.65（ $p < 0.01$ ）；C：N与N：P的相关性并不明显。

表1 脱甲河小流域土壤C、N、P描述性统计学特征

Table 1 Descriptive statistics of soil C, N and P in the Tuojia watershed

指标Index	范围Range (g kg ⁻¹)	均值Mean (g kg ⁻¹)	偏度Skewness	变异系数CV (%)
SOC	1.02 ~ 33.63	13.01 ± 5.52	0.20	42.4
TN	0.48 ~ 3.14	1.48 ± 0.57	0.54	38.5
TP	0.17 ~ 1.36	0.50 ± 0.20	0.91	40.8
C : N	2.23 ~ 26.11	10.43 ± 3.72	0.72	35.6
C : P	9.35 ~ 206.08	72.13 ± 33.20	1.17	46.0
N : P	1.90 ~ 16.10	7.14 ± 2.64	0.63	37.0

注：SOC指土壤有机碳，TN指土壤全氮，TP指土壤全磷，C : N : P为SOC : TN : TP的原子数比值。Note: SOC is soil organic carbon, TN, of total nitrogen, TP, of total phosphorus and C : N : P, of atomic ratio of SOC : TN : TP.

2.2 小流域表层土壤碳、氮、磷含量及C : N : P的空间分异特征

半方差分析结果显示脱甲河小流域土壤SOC、TN及TP的空间变异性存在较大的差异(表2)。在半方差函数中，块金值与基台值的比值 $C_0/(C_0+C)$ 可以反映系统变量的空间相关性的程度。若比值 $<25\%$ ，说明系统具有强烈的空间相关性；如比例处于 $25\% \sim 75\%$ 之间，表明系统具有中等的空间相关性；而 $>75\%$ 表示系统空间相关性很弱。变程则表示空间相关性的范围，在 $0.5 \sim 3.5$

km之间为较小范围，在 $3.5 \sim 22.5$ km之间为较大范围。SOC块基比 $C_0/(C_0+C)$ 为 50.0% ，且在变程距离 $2\ 430$ m内具有空间自相关，表明研究区土壤SOC具有小范围的、中等程度的空间自相关性^[8-9]；TN块基比 $C_0/(C_0+C)$ 为 48.3% ，但其变程距离为 $5\ 670$ m，表现出较大范围的中等程度的空间自相关性^[10]；而TP块基比 $C_0/(C_0+C)$ 为 10.7% ，变程距离为 570 m，表现出小范围的高等程度的空间自相关性。

进一步对脱甲河小流域C : N : P原子数比进

表2 土壤碳、氮、磷及其原子比的变异函数理论模型及相关参数

Table 2 Semi-variogram model and its relevant parameters of soil C, N and P and their atomic ratio

指标Index	模型Model	块金值Nugget	基台值Sill	变程Range (m)	$C_0/(C_0+C)$	决定系数 R^2
SOC	指数Exponential	14.86	29.73	2 430	50.0	0.828
TN	球状Spherical	0.185	0.382	5 670	48.3	0.982
TP	指数Exponential	0.0043	0.04	570	10.7	0.547
C : N	指数Exponential	7.63	15.27	3 720	50.0	0.907
C : P	高斯Gussian	25.0	977.0	398	2.6	0.275
N : P	指数Exponential	0.69	6.70	450	10.3	0.208

行半方差分析。研究区土壤C : N和C : P块基比 $C_0/(C_0+C)$ 均为 50.0% ，且其在变程距离 $3\ 720$ m和 398 m内具有空间自相关，表明C : N具有较大范围的、中等程度的空间自相关性，C : P则具有小范围的、中等程度的空间自相关性。与土壤C : N和C : P的空间变异性不同，土壤N : P块基比 $C_0/(C_0+C)$ 为 10.3% ，变程为 450 m，具有小范围的、强空间自相关性。

对脱甲河小流域SOC、TN、TP及碳氮磷原子

数比进行普通克里格插值(见图2)。交叉检验结果表明(见表3)，SOC、TN、TP、C : N、C : P和N : P的测定值与预测值显著相关，且平均差小。可见，利用克里格插值法的空间插值结果相对可靠。

SOC与TN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；而低含量区则出现在南部地势较低的稻田、茶园等农业用地区域。与SOC与TN含量的空间分布不同，小流域内

TP的高含量区主要出现在中部和东南角等相对地势低的稻田、茶园等农业用地区域，而低含量区主要出现在北部相对地势较高的林地区。

土壤C:N高值区主要出现在小流域北部及西南部的林地。C:P的高值区主要出现在地势较高的北部，而N:P具有与C:P相同的空间分布特征，高值区土地利用方式以林地为主，低值区则以

稻田、茶园等农业用地为主。C:P和N:P与TP呈现明显相反的空间分布趋势。

从脱甲河小流域整体来看，河流上游阶段表层土壤的SOC、TN、C:N、C:P和N:P明显高于河流的中下游阶段，而TP则呈现出不尽相同的流域分布趋势，在河流中游阶段的表层土壤TP含量高于上游和下游阶段。

表3 插值结果的精度统计检验

Table 3 Precise statistics verification of interpolation

	SOC	TN	TP	C:N	C:P	N:P
相关系数Correlation coefficient	0.313	0.450	0.261	0.420	0.273	0.258
平均差Mean difference	0.09	0.00	-0.01	-0.08	-0.21	-0.05

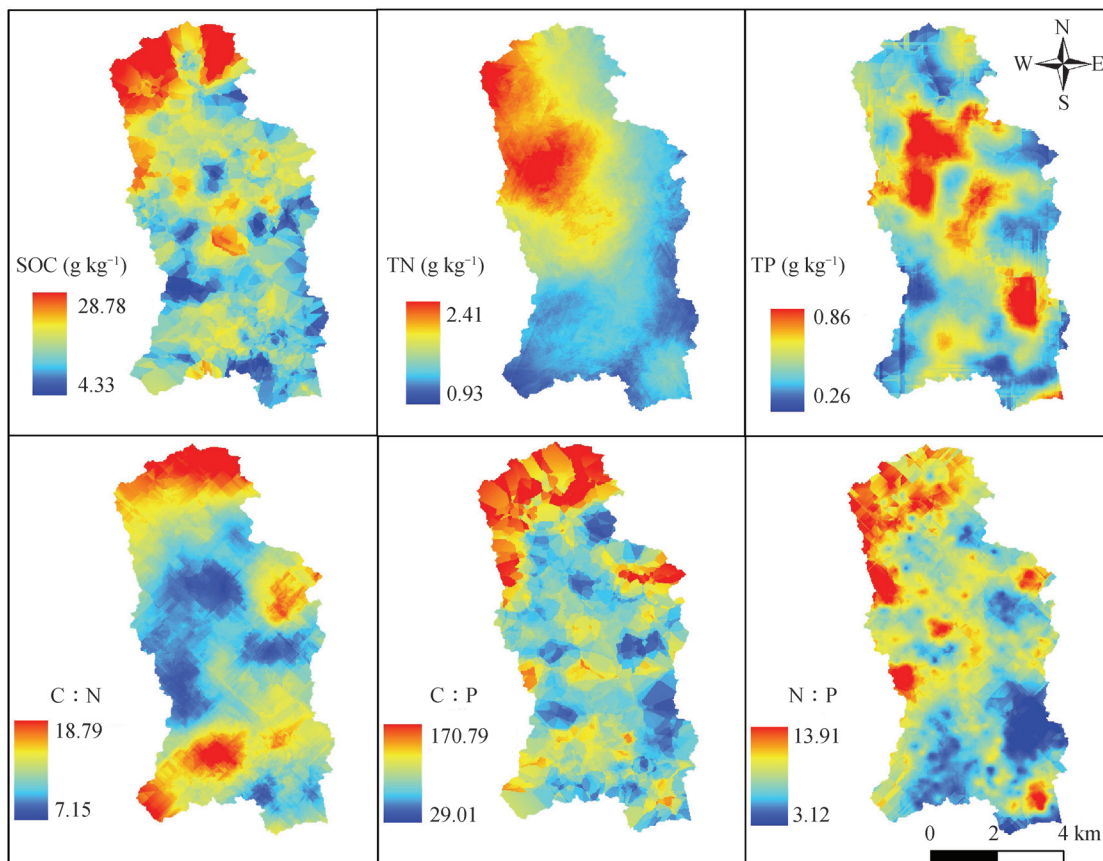


图2 脱甲河小流域土壤C、N、P及其原子比空间预测分布图

Fig. 2 Spatial distribution of soil C, N and P and C:N:P ratio in the Tuoji watershed

2.3 小流域表层土壤C:N:P比值的影响因子

2.3.1 小流域表层土壤C:N:P比值与土地利用的关系 不同土地利用类型下C:N比率的变异程度大小顺序为：茶园>林地>稻田>菜地，茶园与

林地达到高等变异水平，而稻田与菜地为中等变异水平；而C:N比率大小顺序为：菜地>林地、茶园>稻田，且菜地的C:N比率与其他三种土地利用类型的差异显著。

C : P比率的变异程度大小顺序为：茶园 > 菜地 > 林地 > 稻田，茶园、菜地和林地达到高等变异水平，仅稻田为中等变异水平。C : P比率的大小顺序为：林地 (91.37) > 稻田 (66.41) > 茶园 (53.74) > 菜地 (48.79)。统计分析表明菜地的 C : P比率与茶园的差异不显著，但与稻田和林地的差异极显著。

N : P的变异程度大小顺序为：菜地 > 稻田 > 林地 > 茶园，茶园与林地为中等变异水平，而稻田与菜地达到高等变异水平，N : P比率的大小顺序为：林地 (8.79) > 稻田 (6.83) > 茶园 (5.25) > 菜地 (4.10)，且菜地与茶园差异不显著，但与稻田和林地的差异显著 (见表4)。

表4 不同土地利用类型土壤C : N : P描述性统计学特征

Table 4 Descriptive statistics of soil C : N : P relative to land use type

土地利用类型 Landuse	样本数 Number of sample	C : N			C : P			N : P		
		范围 Range	均值 Mean	变异系数CV (%)	范围 Range	均值 Mean	变异系数CV (%)	范围 Range	均值 Mean	变异系数CV (%)
菜地 Vegetable land	21	5.68 ~ 15.55	12.37a	22.0	18.13 ~ 108.9	54.04C	44.6	1.90 ~ 7.07	4.39C	36.5
茶园 Tea garden	64	2.23 ~ 17.70	10.49b	43.4	9.35 ~ 139.1	53.74C	53.8	2.75 ~ 8.86	5.25C	29.4
稻田 Paddy field	263	4.88 ~ 21.13	10.23b	29.5	15.23 ~ 149.8	66.52B	32.4	2.64 ~ 16.10	6.85B	36.1
林地 Woodland	186	3.62 ~ 26.11	10.47b	41.1	18.45 ~ 206.1	88.75A	46.6	2.49 ~ 15.25	8.55A	29.1

注：同一列数据小写字母表示差异显著 ($p < 0.05$)，大写字母表示差异极显著 ($p < 0.01$) Note: The lowercase letters in the same column indicate significant difference ($p < 0.05$), capital letters do extremely significant difference ($p < 0.01$)

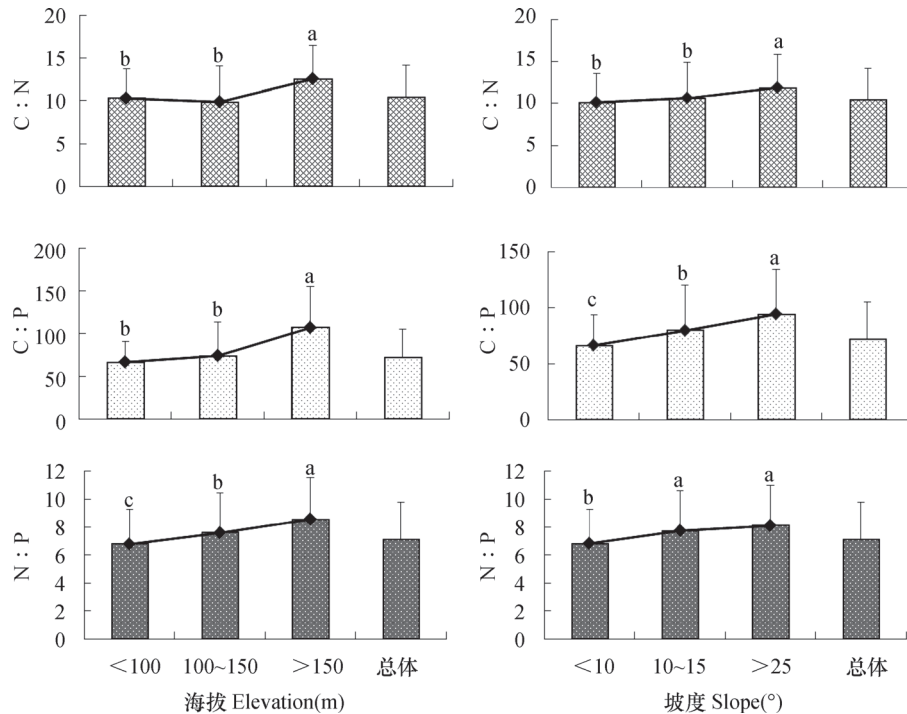
2.3.2 小流域表层土壤生态计量C : N : P与地形因子的关系 随着海拔的升高，土壤C : N : P比值存在明显的变化。如图3所示，在 < 100m、100m ~ 150m和 > 150m三个海拔范围内，小流域土壤C : N值依次为10.32、9.84和12.54，C : P为66.69、74.21和107.43，N : P为6.80、7.61和8.57。可见，土壤C : N在高海拔区域明显高于低海拔区域；然后随海拔增加土壤C : P和N : P呈增加的趋势 (图3)。

在 < 10°、10° ~ 25°和 > 25°三个坡度范围内，小流域土壤C : N值依次为10.13、10.61和11.87，C : P为66.34、80.05和94.03，N : P为6.82、7.75和8.12。可见，随着随海拔的升高，土壤C : N、C : P和N : P出现增加的趋势，且C : P增加最为显著 (图3)。

3 讨论

3.1 碳、氮、磷含量的空间格局及其与土地利用、地形因子的关系

脱甲河小流域土壤碳、氮、磷空间分布结果表明，土壤SOC和TN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^[10-11]。研究表明，不同土地利用之间土壤SOC、TN和TP含量差异显著，而总体上SOC、TN与坡度之间相关性显著。这表明土壤SOC和TN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^[12-13]。综上所述，脱甲河小流



注：同一指标标有不同字母的表示其统计差异达到显著水平 ($p < 0.05$) Note: The same index affixed with different letters showed significant difference ($p < 0.05$)

图3 土壤C:N:P在不同海拔和坡度的差异分析

Fig. 3 Variation of soil C:N:P ratio relative to elevation and slope

域土壤SOC和TN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TP的空间分布特征恰好与SOC和TN相反，低值区分布在高海拔区域，而高值区则分布在低海拔区，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^[14]，同时相比土壤碳氮元素，土壤磷素不易发生迁移^[15-16]。可见脱甲河小流域土壤TP空间变异主要受到土壤类型、海拔高度以及施肥的影响。

3.2 生态计量的空间格局规律及其影响因素

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^[17]。脱甲河小流域的研究结果表明，其中土壤SOC与TN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^[1, 4]。而土壤SOC、TN与TP也显著相关，随着TP含量的增加，SOC、TN含量先增加后缓慢减少并趋于稳定。同时，研究区不同土地利用类型之间C、N、P生态计量特征有明显差异，菜地土壤TP含量最高，SOC和TN含量仅此于稻田，而其C:N最高，但是N:P与C:P却最低，

变异系数较大，这主要是因为亚热带地区，菜地一般每年种植5~10茬，其肥料使用量大且差异大^[14]。稻田土壤TP含量次于菜地土壤，SOC和TN含量最高，然而其C:N最低，N:P与C:P次于林地土壤，变异系数较小。相比菜地土壤，稻田土壤一般一年种植两季，且水稻为喜水作物，C、N、P计量特征不仅受到化肥使用的影响还受到土壤水分的影响^[1]。林地土壤SOC、TN和TP含量均较低，然而其N:P与C:P最高，C:N则仅次于菜地，主要是因为林地土壤受人为干扰，自然状态TP含量低，而C、N储量丰富。

土壤C:N:P比对土壤碳储量具有良好的指示作用^[1]，脱甲河小流域土壤总体C:N:P为72.7:7.2:1，与中国热带和亚热带地区土壤C:N:P(78:6.4:1)^[3]基本上持平。脱甲流域土壤C:N:P比与海拔和坡度有关。在低海拔和缓坡区域，土壤C:N:P为66.7:6.8:1和66.3:6.8:1，计量比值较低，而在高海拔和陡坡区域，土壤C:N:P(对应值为107.4:8.6:1和94.03:8.12:1)比值最高，并且显著高于其他区域。在高海拔和陡坡区域，主要用地类型为林地，

人为干扰少，碳储量高于其他用地^[4]，且人为施肥少，土壤磷素含量较低，使得在高海拔和陡坡区域土壤C:N:P比较高于其他区域。以往研究表明，土壤C:N:P与表层土壤Olsen-P具有相同的空间分布趋势^[18]，这是因为土壤C:N:P与土壤有效氮磷之间存在着一定的关系^[19-20]。

4 结 论

脱甲河小流域SOC、TN及TP受地形和土地利用方式的影响。SOC和TN高含量区主要分布在北部地势相对较高的林地，而低含量区则出现在南部地势较低的农田区域；土壤TP的含量分布整体上与SOC和TN相反。不同土地利用类型土壤N:P与C:P的大小顺序为：林地>稻田>茶园>菜地，而C:N为菜地>林地>茶园>稻田。整体上，土壤C:N、C:P、N:P高值区域主要分布在海拔高、人为干扰少和化肥使用少的林地分布区，而低值区主要分布在海拔较低、人类活动频繁以及化肥施用量大的农田分布区。可见，土地利用方式、海拔和坡度是影响本研究区域土壤碳、氮、磷计量特征的重要因素。

参 考 文 献

- [1] 王维奇, 仝川, 贾瑞霞, 等. 不同淹水频率下湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征. 水土保持学报, 2010, 24 (3) : 238—242. Wang W Q, Tong C, Jia R X, et al. Ecological stoichiometry characteristics of wetland soil carbon, nitrogen and phosphorus in different water-flooded frequency (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24 (3) : 238—242
- [2] 程滨, 赵永军, 张文广, 等. 生态化学计量学研究进展. 生态学报, 2010, 30 (6) : 1628—1637. Cheng B, Zhao Y J, Zhang W G, et al. The research advances and prospect of ecological stoichiometry (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2010, 30 (6) : 1628—1637
- [3] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C: N: P ratios in China' s soils: a synthesis of observational data. Biogeochemistry, 2010, 98: 139—151, doi : 10.1007/s10533-009-9382-0
- [4] Li Y, Wu J S, Liu S L, et al. 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, doi : 10.1029/2012GB004399
- [5] Cleveland C C, Liptzin D. C: N: P stoichiometry in soil: Is there a “Red-field ratio” for the microbial biomass? Biogeochemistry, 2007, 85: 235—252, doi : 10.1007/s10533-007-9132-0
- [6] 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. Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [7] 张仁铎. 空间变异理论及应用. 北京: 科学出版社, 2005. Zhang R D. Spatial variation theory and application (In Chinese). Beijing: Science Press, 2005
- [8] Cambardella C A, Yost R S, Wade M K, et al. Field - scale variability of soil properties in central Iowa soils. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58: 1501—1511
- [9] Kravchenko A N. Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67: 1564—1571
- [10] 郭旭东, 傅伯杰, 马克明, 等. 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. Guo X D, Fu B J, Ma K M, et al. Spatial variability of soil nutrients based on geostatistics combined with GIS—A case study in Zunhua City of Hebei Province (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11 (4) : 557—563
- [11] Robertson G P, Crum J R, Ellis B G. The spatial variability of soil resources following long-term disturbance. Oecologia, 1993, 96: 451—456
- [12] 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—182, 187. Cao L H, Zhao S W. Progress of study on factors of affecting the SOC pooland measures for its regulating and controlling (In Chinese). Journal of Northwest A & F University : Natural Science Edition, 2007, 35 (3) : 177—182, 187
- [13] 王敬, 李贤伟, 荣丽, 等. 森林土壤氮储量及氮素输入过程研究进展. 世界林业研究, 2008, 21 (1) : 14—19. Wang J, Li X W, Rong L, et al. Advances in the study of the nitrogen storages and nitrogen input process of forest soil (In Chinese). World Forestry Research, 2008, 21 (1) : 14—19
- [14] Qin H L, Quan Z, Liu X L, et al. 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

- [15] 金慧龙, 李裕元, 高茹, 等. 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. Jin H L, Li Y Y, Gao R, et al. Distribution of soil nitrogen, phosphorus and its environmental effect in a small subtropical watershed (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(3): 123—126
- [16] 许晓光, 李裕元, 孟岑, 等. 亚热带区稻田土壤氮磷淋失特征试验研究. 农业环境科学学报, 2013, 32(5): 991—999. Xu X G, Li Y Y, Meng C, et al. The characteristics of nitrogen and phosphorus leaching in a paddy soil in subtropics (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(5): 991—999
- [17] 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. 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
- [18] 杨文, 周脚根, 焦军霞, 等. 亚热带丘陵小流域土壤有效磷空间变异与淋失风险研究. 环境科学学报, 2015, 35(2): 541—549. Yang W, Zhou J G, Jiao J X, et al. Spatial variation and leaching risk of soil phosphorus in a small hilly watershed of the subtropical China (In Chinese). Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(2): 541—549. doi: 2014, 10.13671/j.hjkxxb.2014.0849
- [19] Walker T W, Adams A F R. Studies on soil organic matter: I. Influence of phosphorus content of parent materials on accumulations of carbon, nitrogen, sulfur, and organic phosphorus in grassland soils. Soil Science, 1958, 85(6): 307—318, doi: 10.1097/00010694-195806000-00004
- [20] Walker T W, Syers J K. The fate of phosphorus during pedogenesis. Geoderma, 1976, 15: 1—19, doi: 10.1016/0016-7061(76)90066-5

SPATIAL VARIATION OF ECOLOGICAL STOICHIOMETRY OF SOIL C, N AND P IN A SMALL HILLY WATERSHED IN SUBTROPICS OF CHINA

Yang Wen^{1, 2} Zhou Jiaogen¹ Wang Meihui¹ Han Zeng¹ Zhang Manyi¹ Li Yuyuan^{1*} Lü Dianqing^{2*}
Wu Jinshui¹

(1 Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)

(2 College of Resources and Environmental Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

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 of the ecological stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus is conducive to soil nutrient management. Spatial distributions of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and stoichiometric characteristics of soil C, N and P in the topsoil (0~20 cm) were systematically analyzed of a representative small hilly watershed in the subtropical region of China. The watershed studied is the Tuojahe watershed located in Jinjing Town, Changsha County, Hunan Province. A total of 529 valid soil samples of the watershed were collected by type of land use and of landform, including 21 from vegetable fields, 64 from tea gardens, 262 from rice fields and 182 from woodlands, and averaging about 10 points km⁻² in density. The samples were analyzed in lab for total nitrogen, total phosphorus and organic carbon and further for ecological stoichiometric characteristics and spatial variability of the three indices in the topsoil layer of the watershed with the aid of the GS+Version9 and ArcGIS9.3 softwares. Results show that the mean content of soil organic carbon, total nitrogen and total phosphorus was 13.09 g kg⁻¹, 1.50 g kg⁻¹ and 0.51 g kg⁻¹, with coefficients of variation being 42.4%, 38.5% and 40.8%, and variation range being 2, 430m, 5, 670m and 570m; respectively; and the mean ratio of C : N, C : P and N : P was 10.42, 72.71 and 7.19, respectively, with coefficients of variation being

35.6%, 46.0% and 37.0%, and variation range being 3, 720m, 398m and 450m, respectively. To sum up, the soil C, N and P and their stoichiometric ratios in the watershed are very high in spatial variation and moderate in spatial autocorrelation ($C_0 / (C_0 + C) \leq 50\%$). The soils high in soil C : N, C : P and N : P ratio were mainly distributed in areas of woodlands high in altitude, less in human interference and low in fertilization rate, while the soils low in the ratio were mainly in the areas of farmlands, low in elevation, frequent in human activity and high in fertilization rate, which poses a marked contrast to the spatial distribution characteristics of total phosphorus. Soil C : N : P ratio varies sharply with the type of land use (vegetable field, paddy field, tea garden and woodlot). In terms of soil C : N ratio, the four types follow an order of vegetable field > woodland, tea garden > paddy field, in terms of C : P ratio an order of woodland (91.37) > paddy field (66.41) > tea garden (53.74) > vegetable field (48.79), and in terms of N : P ratio, an order of woodland (8.79) > paddy field (6.83) > tea garden (5.25) > vegetable field (4.10). In addition, relationships of the ecological stoichiometric C : N : P ratios of the surface soils with topographic factors were analyzed. Results show that they vary with elevation, Soil C : N ratio is 10.32, 9.84 and 12.54, C : P ratio 66.69, 74.21 and 107.43, and N : P ratio 6.80, 7.61 and 8.57 in soils < 100m, 100m ~ 150m and > 100m in elevation, respectively. Soil C : N is significantly higher in areas high in elevation than in areas low in elevation, and similar trends are found of soil C : P and N : P. In the areas high in elevation and steep in slope, soil C : N : P ratios tend to be significantly high, which indicates that the spatial variation of soil C : N : P in the topsoil layer of the study area is closely related to environmental factors, such as land management practices and topography. The findings of the study may provide some important information and data basis for scientific management of soil nutrients in small hilly watersheds in the subtropics of China.

Key words Carbon; Nitrogen; Phosphorus; Ecological stoichiometry; Spatial variation; Subtropical hilly watershed

(责任编辑: 檀满枝)