

不同利用方式下南京城市土壤碳、氮、磷的化学计量学特征

袁大刚^{1,2}, 张甘霖^{1*}

(1. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室/中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京 210008;
2. 四川农业大学资源环境学院, 四川 成都 611130)

摘要: 选择南京的菜地、公园绿地和道路土壤作为研究对象, 测定其总有机碳 (OC)、总氮 (TN)、总磷 (TP)、有机磷 (OP) 等指标, 分析了城市人类活动影响下土壤碳、氮、磷的生态化学计量学特征。结果如下: (1) 城市土壤全剖面 OC、TP 含量均为道路 > 菜地 ≈ 绿地, TN 为菜地 > 道路 ≈ 绿地, OP 为菜地 > 道路 > 绿地, OC: TN 为菜地 < 绿地 < 道路, OC: TP 为道路 < 菜地 ≈ 绿地, TN: TP 为道路 < 绿地 ≈ 菜地, OC: OP 为菜地 < 绿地 ≈ 道路, TN: OP 为菜地 < 道路 ≈ 绿地, 表明不同的土地利用方式会对城市土壤碳、氮、磷的化学计量学特征产生不同的影响; (2) 与中国和世界非城市土壤的平均水平相比, 南京城市土壤碳、氮、磷比例严重失衡; (3) 对于不同利用方式的城市土壤, 其碳、氮、磷含量对相应化学计量比的影响是不同的。

关键词: C: N: P; 菜地; 绿地; 道路; 化学计量学

中图分类号: Q142.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6257 (2013) 03-0019-06

生态化学计量学是研究生态交互作用过程中多种化学元素间的质量平衡与相互制约关系的一种重要方法^[1], 其中 C: N: P 化学计量学是各种生态过程研究的核心内容^[2]。由于土壤是养分循环的重要调节器, 生态化学计量学应用于土壤这一陆地生态系统是最激励人心的领域之一^[1]。Post 等探讨了土壤 C: N 在 Holdridge 生命带的分布特征, 认为 C: N 的高低与气候、植被关系密切^[3]。Cleveland 和 Liptzin 利用来自多个国家的 48 篇文献的 186 个表层土壤的观测数据, 探讨了林地、草地及其他土壤碳、氮、磷的生态化学计量学特征, 得出“尽管在不同植被间土壤 C: N: P 比值存在变异现象, 但从大多数情况来看, 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”的结论^[4]; Kirkby 等研究了澳大利亚土壤碳、氮、磷、硫的化学计量学特征, 并与其他国家土壤碳、氮、磷、硫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: S 比值在全球大范围的土壤间是一致的^[5]。Tian 等利用第二次土壤普查的 2 384 个剖面数据,

研究了不同气候、发育阶段和土层深度土壤碳、氮、磷的生态化学计量学特征, 得知中国土壤整个剖面的 C: N 在不同气候区、土壤类型、土层深度和风化发育阶段的变异均较小, 而 C: P 和 N: P 的变异均较大; 表层 0 ~ 10 cm 土壤 C: N 存在良好的一致性, C: P 和 N: P 也存在相对的一致性, C: N: P 比值为 134: 9: 1^[6]; Yang 等研究了青藏高原草地土壤 C: N 的垂直分布特征, 得到如下认识: 尽管土壤 C: N 存在随深度增加而降低的趋势, 但各土层之间的平均值无显著差异; 各草地类型之间也无显著差异^[7]。

人类活动对碳、氮、磷的生态化学计量学特征有重要影响^[8]。许泉等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)^[9]; Li 等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^[10]; Wei 等比较了黄土高原天然牧草地与分别在该草地上种植油松和柠条形成的两种林地土壤的碳、氮、磷计量学特征差异, 结果表明, 0 ~ 20 cm 土壤 C: N 为油松林地 > 天然牧草地 > 柠条林地, 但 20 ~ 100 cm 土壤 C: N 为天然牧草地 > 油松林地 > 柠条林地^[11]; 刘兴诏等对亚热带不同演替阶段的森林土壤碳、氮、磷化学计量特征的研究表明, 受工业化、城市化导致的高氮沉降等影响, 土壤 N: P 随演替的进行呈现明显增

收稿日期: 2012-09-13; 最后修订日期: 2012-12-11

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (40625001); 中国科学院知识创新工程方向性项目 (KZCX2-YW-409)。

作者简介: 袁大刚 (1975-), 男, 重庆云阳人, 副教授, 博士, 主要从事土壤形成过程与生态环境演变及土壤系统分类研究。通讯作者为张甘霖。

加趋势^[12]，而刘万德等对季风常绿阔叶林土壤碳、氮、磷化学计量特征的研究表明，土壤 N:P 及 C:P 比值随森林皆伐后恢复时间的延长呈减小趋势^[13]；罗亚勇等对不同退化阶段的高寒草甸土壤化学计量特征的研究表明，随着高寒草甸退化的加重，0~100 cm 土壤 C:N、C:P 及 N:P 均呈降低趋势^[14]；王维奇等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^[15]。

城市土壤是城市范围（包括市区和郊区）受人类活动强烈影响的土壤，大量研究^[16-24]已经表明，城市土壤碳、磷富集，但对 C:N、C:P 和 N:P，尤其是后两者影响城市土壤碳、氮、磷循环和园林植物营养平衡的生态化学计量学特征的探讨却较少^[25-27]。随着城市化快速推进，城市土壤成为陆地生态系统的重要组成部分^[16,28]。因此，本研究在南京市主城区选择仅表土受到人类农业活动干扰的菜地土壤，整个土层均遭扰动但地表未封闭的公园绿地土壤和整个土层均遭扰动且地表封闭的道路土壤作为研究对象，测定其总有机碳、总氮、总磷、有机磷和有效磷等指标，利用数理统计方法，分析城市土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征及其影响因素，探讨城市土壤碳、氮、磷的平衡状况，为园林绿化中植物配置和肥料施用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区南京位于北纬 33°31′，东经 118°47′，属于北亚热带季风气候，年均降水量 1 106.5 mm，年均温 16℃；成土母质以下蜀黄土、黄土状物质为主；土壤类型按中国土壤系统分类检索^[29]，有淋溶土、雏形土、新成土和人为土等类型。

1.2 样品采集与处理

本研究选择南京市主城区以下蜀黄土、黄土状物质为主要细土物质（≤2 mm）的菜地、公园绿地和道路土壤作为研究对象，于 2004 年 9~12 月采集土壤样品。在土壤样品采集过程中，菜地土壤主要根据在不同区域的城中村考察结果选取典型点位挖掘土壤剖面，而公园绿地和道路土壤主要选取不同区域城市建设中大树移栽、管线维

护、工程建设等挖掘的达一定深度且便于取样的土壤断面，再根据土壤颜色、结构、根系、侵入体、湿润状况等形态特征划分层次，并自下而上分层采样。共采集 14 个剖面 83 个样品，其中菜地土壤 5 个剖面计 28 个样品，公园绿地土壤 4 个剖面计 27 个样品，道路土壤 5 个剖面计 28 个样品，详细信息见文献 [30]。采集的样品在室内阴凉通风处晾干后，用玛瑙研钵磨细，分别过 2、0.25 和 0.149 mm 尼龙筛，保存于牛皮纸袋内备用。

1.3 指标测定

土壤总有机碳（OC）用重铬酸钾-硫酸消化法测定^[31]；全氮（TN）用硒粉-硫酸铜-硫酸消化-凯氏定氮法测定^[31]；全磷（TP）用氢氟酸-高氯酸消化-钼锑抗比色法测定^[31]；有机磷（OP）用灼烧-钼锑抗比色法测定^[32]；无机磷（IP）= TP-OP；有效磷（AP）用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定^[31]。

1.4 数据处理

土壤 OC:TN、OC:TP、TN:TP、OC:OP、TN:OP 和 OP:IP 均为物质的量比。在数据处理过程中，用 Microsoft Office Excel 2003 进行描述性统计分析，用 SPSS 17.0 for Windows 进行方差分析和多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用条件下城市土壤碳、氮、磷的含量特征

菜地、绿地和道路土壤碳、氮、磷的描述性统计特征见表 1。由表 1 可见，OC 含量最大值出现在绿地，最小值出现在菜地，平均值为道路 > 菜地 ≈ 绿地，变异系数为绿地 > 菜地 > 道路；TN 含量最大值出现在菜地，最小值出现在绿地，平均值为菜地 > 道路 ≈ 绿地，变异系数为菜地 > 绿地 > 道路；TP 和 IP 含量最大值出现在道路，最小值出现在菜地，平均值为道路 > 菜地 ≈ 绿地，变异系数为绿地 > 菜地 > 道路；OP 含量最大值、最小值均出现在道路，平均值为菜地 > 道路 > 绿地，变异系数为道路 > 菜地 > 绿地；AP 含量最大值、最小值均出现在菜地，而平均值为道路 > 菜地 > 绿地，变异系数为菜地 > 绿地 > 道路。以上分析表明，不同利用方式的城市土壤具有不同的碳、氮、磷含量特征。

表1 不同土地利用条件下南京城市土壤碳、氮、磷含量特征

指标	土地利用方式	最大值 ($g \cdot kg^{-1}$)	最小值 ($g \cdot kg^{-1}$)	平均值 ($g \cdot kg^{-1}$)	标准差 ($g \cdot kg^{-1}$)	变异系数 (%)
OC	菜地	24.4	1.71	9.51 b	7.01	73.8
	绿地	30.1	1.84	8.98 b	7.85	87.4
	道路	26.8	3.13	13.5 a	6.48	48.0
TN	菜地	2.87	0.38	1.11 a	0.69	62.0
	绿地	2.29	0.34	0.74 b	0.41	55.2
	道路	1.16	0.37	0.79 b	0.22	27.8
TP	菜地	2.82	0.28	1.07 b	0.66	61.0
	绿地	3.48	0.34	0.90 b	0.59	65.8
	道路	7.60	0.98	3.21 a	1.78	55.5
OP	菜地	0.408	0.032	0.176 a	0.102	57.9
	绿地	0.149	0.019	0.069 c	0.030	43.8
	道路	0.477	0.009	0.127 b	0.096	75.8
IP	菜地	2.45	0.23	0.90 b	0.58	64.1
	绿地	3.40	0.29	0.83 b	0.59	70.6
	道路	7.46	0.97	3.08 a	1.73	56.2
AP	菜地	0.360	0.006	0.095 b	0.107	113
	绿地	0.106	0.010	0.036 c	0.026	72.1
	道路	0.356	0.040	0.143 a	0.085	59.6

注: (1) 物质含量均用单质元素含量表示; (2) 字母 a、b、c 表示同一指标平均值在不同土地利用间的多重比较结果, 表示在 5% 水平上显著。下同。

2.2 不同土地利用条件下城市土壤碳、氮、磷的比值特征

菜地、公园绿地和道路土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征的描述性统计值见表 2。从表 2 可知, 对于 OC: TN, 最大值出现在道路土壤, 而最小值出现在菜地土壤, 平均值大小顺序为菜地 < 绿地 < 道路, 变异系数为菜地 < 道路 < 绿地; 对于 OC: TP, 最大值存在于绿地土壤, 而最小值存在于道路土壤, 平均值大小顺序为道路 < 菜地 ≈ 绿地, 变异系数为菜地 < 道路 < 绿地; 对于 TN: TP, 最大值存在于绿地土壤, 而最小值出现在道路土壤, 平均值大

小顺序为道路 < 绿地 ≈ 菜地, 变异系数为道路 < 菜地 < 绿地; 对于 OC: OP, 最大值出现在道路土壤, 而最小值出现在菜地土壤, 平均值大小顺序为菜地 < 绿地 ≈ 道路, 变异系数为菜地 < 绿地 < 道路; 对于 TN: OP, 最大值与最小值均出现于道路土壤, 平均值大小顺序为菜地 < 绿地 ≈ 道路, 变异系数为菜地 < 绿地 < 道路; 对于 OP: IP, 最大值存在于菜地土壤, 平均值大小顺序为道路 < 绿地 < 菜地, 变异系数为菜地 < 绿地 < 道路。以上分析表明, 不同利用方式的城市土壤具有不同的碳、氮、磷比值特征。

表2 不同土地利用条件下南京城市土壤碳、氮、磷化学计量比的特征

比值	土地利用方式	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数 (%)
OC: TN	菜地	15.3	4.34	9.32 c	3.05	32.7
	绿地	25.3	4.44	12.7 b	5.74	45.1
	道路	39.6	8.07	19.7 a	8.01	40.7
OC: TP	菜地	45.7	8.91	22.6 a	11.0	48.4
	绿地	107	7.52	27.1 a	22.4	82.4
	道路	34.3	3.37	13.8 b	8.87	64.2
TN: TP	菜地	6.20	1.13	2.55 a	1.30	50.9
	绿地	7.00	0.53	2.08 a	1.18	57.0

(续表)

比值	土地利用方式	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数 (%)
OC: OP	道路	1.71	0.33	0.67 b	0.33	49.0
	菜地	221	47.6	135 b	50.2	37.1
	绿地	1 287	113	330 a	261	79.1
TN: OP	道路	1 393	88.0	424 a	364	85.7
	菜地	32.8	5.28	15.6 b	6.96	44.6
	绿地	65.2	13.6	25.2 a	12.0	47.7
OP: IP	道路	90.9	4.74	22.7 ab	19.6	86.3
	菜地	0.49	0.05	0.22 a	0.10	46.4
	绿地	0.26	0.01	0.10 b	0.05	52.7
	道路	0.11	0.01	0.04 c	0.03	65.4

2.3 不同土地利用条件下城市土壤碳、氮、磷的化学计量比与其分子、分母的相关关系

由表3可见,对于OC:TN,3种土地利用的土壤均与OC呈极显著正相关关系,菜地和绿地与TN也呈显著正相关关系,而道路土壤与TN呈正相关性,但不显著。对于OC:TP,3种土地利用的土壤也都与OC呈极显著正相关,道路土壤还与TP呈极显著负相关关系,而菜地和绿地土壤与TP的相关性不显著。对于TN:TP,菜地和绿地土壤与TN呈显著或极显著正相关关系,而与TP的负相关性不显著;道路土壤与TN的负相关性不显著,而与TP呈极显著负相关关系。对于OC:OP,菜地和绿

地土壤均与OC呈极显著正相关关系,而与OP的正相关性不显著;道路土壤与OC的正相关性不显著,而与OP呈极显著负相关性。对于TN:OP,3种土地利用的土壤均与TN的相关性不显著,绿地土壤与OP的相关性也不显著,而菜地和道路土壤与OP呈显著或极显著负相关关系。对于OP:IP,绿地和道路土壤与OP呈极显著正相关关系,而菜地与OP的正相关关系不显著;菜地和绿地土壤与IP呈显著或极显著负相关关系,而道路土壤与IP的负相关关系不显著。以上分析表明,对于不同利用方式的城市土壤,其碳、氮、磷的化学计量比与其相应分子、分母的相关性具有各自不同的特征。

表3 不同土地利用条件下南京城市土壤元素化学计量比与其分子、分母的相关关系

比值	土地利用方式	OC	TN	TP	OP	IP
OC: TN	菜地	0.711 **	0.392*	—	—	—
	绿地	0.813 **	0.468*	—	—	—
	道路	0.819 **	0.131	—	—	—
OC: TP	菜地	0.628 **	—	0.040	—	—
	绿地	0.890 **	—	-0.097	—	—
	道路	0.648 **	—	-0.618 **	—	—
TN: TP	菜地	—	0.422*	-0.353	—	—
	绿地	—	0.780 **	-0.346	—	—
	道路	—	0.082	-0.699 **	—	—
OC: OP	菜地	0.526 **	—	—	0.145	—
	绿地	0.730 **	—	—	0.041	—
	道路	0.121	—	—	-0.564 **	—
TN: OP	菜地	—	0.161	—	-0.443*	—
	绿地	—	0.335	—	-0.301	—
	道路	—	-0.355	—	-0.623 **	—
OP: IP	菜地	—	—	—	0.236	-0.381*
	绿地	—	—	—	0.561 **	-0.539 **
	道路	—	—	—	0.603 **	-0.224

注: * 表示在 $P \leq 0.05$ 水平上显著, ** 表示在 $P \leq 0.01$ 水平上显著。

3 讨论

3.1 不同土地利用条件下城市土壤碳、氮、磷含量水平评价

按土壤普查技术标准^[33] (土壤养分含量分为六级, 其中第一级为最高, 第六级为最低), 从表1中OC的平均含量来看, 菜地和公园绿地土壤均处于第四级水平, 而道路土壤处于第三级水平, 可能与道路土壤中不易矿化的黑碳量较高并不断积累有关^[19]; 从TN平均含量来看, 菜地土壤处于第三级水平, 而公园绿地和道路土壤均处于第四级水平, 与菜地施用氮肥比公园和道路土壤频繁且量多有关; 从TP和AP平均含量来看, 菜地和道路土壤均处于第一级水平 (但道路土壤显著高于菜地土壤), 绿地土壤处于第二级水平。菜地土壤TP和AP含量很高, 与其长期施肥及磷的迁移能力差有关, 而道路、绿地土壤之所以有较高的TP和AP, 与富磷垃圾堆填多及磷的迁移能力差有关^[20]。AP含量超过 $25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时将对水体环境带来危害^[34]。本研究中的菜地、绿地和道路土壤AP平均值 (表1) 均超过此临界值, 表明城市土壤磷的流失风险很高。

3.2 不同土地利用条件下城市土壤碳、氮、磷化学计量比反映的城市土壤碳、氮、磷平衡状况

对于OC:TN, Tian等对第二次土壤普查中2384个剖面数据的分析发现, 中国土壤剖面与表层OC:TN的平均值分别为11.9和14.4^[6], Cleveland和Liptzin通过对全球55个林地土壤、75个草地土壤和146个包括林地、草地和其他利用方式的总体土壤的分析, 发现林地、草地、总体土壤的表层OC:TN的平均值分别为14.5、13.8和14.3^[4], 南京菜地土壤OC:TN平均值为9.32 (表2), 低于中国和世界土壤; 绿地土壤OC:TN平均值为12.7 (表2), 低于中国和世界表层土壤, 但高于中国土壤剖面的比值; 道路土壤OC:TN平均值为19.7 (表2), 高于中国和世界土壤。菜地土壤较低的OC:TN与其长期大量施用氮肥满足蔬菜生产有关, 而道路土壤中较高的OC:TN, 与来源于道路铺筑使用沥青, 致使土壤黑碳(BC)含量比菜地土壤BC含量高^[35], 且BC:OC随BC的增加而升高^[19]有关, 同时, 与路面封闭后没有新的物质输入, 而行道树的生长却源源不断地吸收利用土壤中的氮素营养, 导致氮素已处于较低含量水平 (表1) 有关。

绿地土壤表层有一定的灌溉、施肥, 但枯枝落叶也进入土壤, 导致其OC:TN也不高。

对于OC:TP, Tian等对第二次土壤普查中2384个剖面数据的分析发现, 中国土壤剖面与表层OC:TP的平均值分别为61和136^[6], Cleveland和Liptzin通过对全球47个林地土壤、72个草地土壤和135个包括林地、草地和其他利用方式的总体土壤的分析, 发现林地、草地、总体土壤的表层OC:TP的平均值分别为211.7、166.0和186.0^[4], 南京菜地、绿地和道路土壤的OC:TP平均值分别为22.6、27.1和13.8 (表2), 均远低于中国和世界土壤的比值; 对于TN:TP, Tian等对第二次土壤普查中2384个剖面数据的分析发现, 中国土壤剖面与表层TN:TP的平均值分别为5.2和9.3^[6], Cleveland和Liptzin通过对全球47个林地土壤、72个草地土壤和150个包括林地、草地和其他利用方式的总体土壤的分析, 发现林地、草地、总体土壤的表层TN:TP的平均值分别为14.6、12.3和13.1^[4], 南京菜地、绿地和道路土壤的TN:TP平均值分别为2.55、2.08和0.67 (表2), 均远低于中国和世界土壤的比值。南京城市土壤较低的OC:TP和TN:TP值, 与其TP的显著积累^[17, 18, 20]有关。较低的C:P是磷有效性高的一个指标^[8], 本研究从化学计量比的角度印证了之前从有效磷含量、磷形态及磷的吸附-解吸特征^[17, 18, 20]等方面所获得的“南京城市土壤磷有效性较高, 淋失风险较大”的认识。

通过上述比较分析可以认为, 南京城市土壤氮、磷比例严重失衡。在城市绿化时, 可通过种植豆科植物如合欢、三叶草等措施加强生物固氮, 既将大气中无机的碳和氮转化为有机物质而积累在土壤中, 从而增加土壤碳汇, 提高土壤氮含量, 同时又促进城市土壤中丰富的磷被吸收利用, 进而又减轻磷对水体的危害, 达到园林绿化与生态城市建设双赢的目标。

3.3 不同土地利用条件下城市土壤碳、氮、磷含量对碳、氮、磷化学计量比的影响

表3的分析结果显示, 不同土地利用条件下的城市土壤碳、氮、磷化学计量比与其分子、分母并不是都分别呈显著或极显著正相关和负相关关系, 与潘继花和张甘霖在杨凌地区土垫旱耕人为土中磷的分布特征研究中“OP与OP:IP在干润淋溶土层段呈极显著正相关关系, 而在堆垫层无显著相关

性”^[36]的结果类似。潘继花和张甘霖借此揭示了土垫旱耕人为土的发生过程——干润淋溶土层段土壤发生演变的主导因素是自然因素，而在堆垫层叠加了人类活动的影响。所以，土壤碳、氮、磷化学计量比的碳、氮、磷含量关系并不是王维奇等人认为的“存在自相关关系，不宜进行相关分析”^[15]，而是十分有意义的，可借此判断构成土壤碳、氮、磷化学计量比的分子、分母的相对重要性。

4 结论

不同土地利用方式下的南京城市土壤碳、氮、磷化学计量学特征不同，表明土地利用方式影响城市土壤碳、氮、磷的化学计量学特征；与中国和世界非城市土壤生态系统的平均水平相比，南京城市土壤的碳、氮、磷严重失衡，可配置豆科植物促进其平衡；土壤碳、氮、磷含量是计算碳、氮、磷化学计量学的基础。对于不同利用方式的城市土壤，其碳、氮、磷含量对相应化学计量学的影响是不同的。

本研究丰富了城市土壤的研究内容，今后应进一步结合园林植物生态化学计量学研究，推动城市土壤研究成果在园林绿化中的实际应用。

参考文献:

[1] Elser J J, Urabe J. The stoichiometry of consumer-driven nutrient recycling: theory, observations, and consequences [J]. *Ecology*, 1999, 80 (3): 735-751.

[2] 程滨, 赵永军, 张文广, 等. 生态化学计量学研究进展 [J]. *生态学报*, 2010, 30 (6): 1628-1637.

[3] Post W M, Pastor J, Zinke P J, et al. Global patterns of soil nitrogen storage [J]. *Nature*, 1985, 317 (6038): 613-616.

[4] Cleveland C C, Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil: is there a “Redfield ratio” for the microbial biomass? [J]. *Biogeochemistry*, 2007, 85 (3): 235-252.

[5] 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 [J]. *Geoderma*, 2011, 163 (3-4): 197-208.

[6] 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 [J]. *Biogeochemistry*, 2009, 98 (1-3): 139-151.

[7] Yang Y H, Fang J Y, Guo D L, et al. Vertical patterns of soil carbon, nitrogen and carbon: nitrogen stoichiometry in Tibetan grasslands [J]. *Biogeosciences Discuss*, 2010, 7: 1-24.

[8] 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 [J]. *生态学报*, 2008, 28 (8): 3937-3947.

[9] 许泉, 芮雯奕, 刘家龙, 等. 我国农田土壤碳氮耦合特征的区域差异 [J]. *生态与农村环境学报*, 2006, 22 (3): 57-60.

[10] Li Y, Wu J, Liu S, 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? [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, 26 (GB4002): 14.

[11] Wei X, Shao M, Fu X, et al. Distribution of soil organic C, N and P in three adjacent land use patterns in the northern Loess Plateau, China [J]. *Biogeochemistry*, 2009, 96 (1): 149-162.

[12] 刘兴诏, 周国逸, 张德强, 等. 南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中 N、P 的化学计量特征 [J]. *植物生态学报*, 2010, 34 (1): 64-71.

[13] 刘万德, 苏建荣, 李帅锋, 等. 云南普洱季风常绿阔叶林演替系列植物和土壤 C、N、P 化学计量特征 [J]. *生态学报*, 2010, 30 (23): 6581-6590.

[14] 罗亚勇, 张宇, 张静辉, 等. 不同退化阶段高寒草甸土壤化学计量特征 [J]. *生态学杂志*, 2012, 31 (2): 254-260.

[15] 王维奇, 曾从盛, 钟春棋, 等. 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 [J]. *环境科学*, 2010, 31 (10): 2411-2416.

[16] 张甘霖. 城市土壤的生态服务功能演变与城市生态环境保护 [J]. *科技导报*, 2005, 23 (3): 16-19.

[17] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖. 城市土壤磷素特性及其与地下水磷浓度的关系 [J]. *应用生态学报*, 2001, 12 (5): 735-738.

[18] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖. 南京城市土壤磷的形态和吸附-解吸特征 [J]. *土壤通报*, 2003, 34 (1): 40-43.

[19] 何跃, 张甘霖. 城市土壤有机碳和黑碳的含量特征与来源分析 [J]. *土壤学报*, 2006, 43 (2): 177-182.

[20] Yuan D G, Zhang G L, Gong Z T, et al. Variation of soil phosphorus accumulation in Nanjing, China as affected by urban development [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2007, 170 (2): 244-249.

[21] 章明奎, 符娟林, 厉仁安. 杭州市居民区土壤磷的积累和释放潜力 [J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2004, 30 (3): 300-304.

[22] 章明奎, 周翠. 杭州市城市土壤有机碳的积累和特性 [J]. *土壤通报*, 2006, 37 (1): 19-21.

[23] 边振兴, 王秋兵. 沈阳市公园绿地土壤养分特征的研究 [J]. *土壤通报*, 2003, 34 (4): 284-290.

[24] Sun Y L, Ma J H, Li C. Content and densities of soil organic carbon in urban soil in different function districts of Kaifeng [J]. *Journal of Geographical Science*, 2010, 20 (1): 148-156.

[25] 张廷龙, 孙睿, 胡波, 等. 北京西北部典型城市化地区不同土地利用类型土壤碳特征分析 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2010, 46 (1): 97-102.

[26] 史利江, 郑丽波, 梅雪英, 等. 上海市不同土地利用方式下的土壤碳氮特征 [J]. *应用生态学报*, 2010, 21 (9): 2279-2287.

[27] 管东生, 何坤志, 陈玉娟. 广州城市绿地土壤特征及其对树木

- 生长的影响 [J]. 环境科学研究, 1998, 11 (4): 51-54.
- [28] 张甘霖, 吴运金, 龚子同. 城市土壤——城市环境保护的生态屏障 [J]. 自然杂志, 2006, 28 (4): 205-209.
- [29] 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 中国土壤系统分类课题组. 中国土壤系统分类检索 (第三版) [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001. 21-191.
- [30] 袁大刚, 张甘霖. 不同土地利用条件下的城市土壤电导率垂直分布特征 [J]. 水土保持学报, 2010, 24 (4): 171-176.
- [31] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 62-135.
- [32] 鲍士旦. 土壤农化分析 (第三版) [M]. 北京: 中国农业出版社. 2000. 96-97.
- [33] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1992. 87.
- [34] Zhang G L, Burghardt W, Yang J L. Chemical criteria to assess risk of phosphorus leaching from urban soils [J]. Pedosphere, 2005, 15 (1): 72-77.
- [35] 何跃, 张甘霖, 杨金玲, 等. 城市化过程中黑碳的土壤记录及其环境指示意义 [J]. 环境科学, 2007, 28 (10): 2369-2375.
- [36] 潘继花, 张甘霖. 土垫旱耕人为土中磷的分布特征及其土壤发生学意义 [J]. 第四纪研究, 2008, 28 (1): 43-49.

Stoichiometry of C: N: P in urban soil of Nanjing under different land use

YUAN Da-gang^{1,2}, ZHANG Gan-lin^{1*} (1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture/ Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008; 2. College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130)

Abstract: It is important for eco-city construction and global change to apply the stoichiometry in urban soil systems. Soils from vegetable land, green land, and road in urban Nanjing were sampled, and soil organic carbon (OC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) were tested, soil C: N: P stoichiometry were discussed. The results showed that: (1) The order of soil OC, TP or IP content was road > vegetable land ≈ green land, TN content was vegetable land > road ≈ green land, OP content was vegetable land > road > green land, and the order of OC: TN ratio was vegetable land < green land < road, OC: TP ratio was road < vegetable land ≈ green land, TN: TP ratio was road < green land ≈ vegetable land, OC: OP ratio was vegetable land < green land ≈ road, TN: OP ratio was vegetable land < road ≈ green land, and OP: IP ratio was road < green land < vegetable land for whole profile, which indicated that land use would affect the C: N: P stoichiometry of urban soil. (2) Compared to Chinese and global average of non-urban soil, the balance of C, N, and P in urban soils was destroyed, legumes could be planted to improve the overall balance. (3) Although the C, N and P content was the basis of C: N: P, the effects of soil carbon, nitrogen, and phosphorus on C: N: P stoichiometry was different under different land use.

Key words: C: N: P; vegetable land; green land; road; stoichiometry