

文章编号:1000-5641(2015)02-0133-08

城乡梯度上一年生杂草叶片氮磷含量的变化及其与土壤氮磷的关系

段秀文¹, 蔡北溟¹, 陈晓双¹, 崔易舛¹, 达良俊¹⁻³

- (1. 华东师范大学 生态与环境科学学院, 上海 200241;
2. 华东师范大学 上海市城市化生态过程与生态修复重点实验室, 上海 200241;
3. 华东师范大学 浙江天童森林生态系统国家野外科学观察研究站, 上海 200241)

摘要: 在上海城乡梯度上,选取隶属于禾本科和菊科的3种广布型一年生杂草:狗尾草(*Setaria viridis*)、稗(*Echinochloa crusgalli*)和醴肠(*Eclipta prostrata*),通过测定3种杂草单位质量叶片氮含量、单位质量叶片磷含量及其生境中土壤总氮、总磷的含量,分析城乡梯度上植物叶片氮磷含量的变化及其与土壤氮磷之间的关系,结果表明:①总体上,从中心城区至远郊区,3种一年生杂草的叶片氮含量显著上升,而叶片磷含量无显著变化;②其中,狗尾草与醴肠的叶片氮含量呈显著上升趋势,狗尾草叶片磷含量呈显著上升趋势;③土壤总氮、总磷与植物单位质量叶片氮、叶片磷总量呈显著性负相关($p < 0.05$). 综上可知,杂草的叶片氮磷含量对城市化有显著响应,物种间存在差异;土壤氮磷含量的变化是其成因之一.

关键词: 上海市; 城市化; 一年生杂草; 土壤氮磷

中图分类号: Q948.11 **文献标识码:** A **DOI:**10.3969/j.issn.1000-5641.2015.02.016

Variation of leaf nitrogen and phosphorus of annual weeds along urban-rural gradient and their relationships with soil fertility

DUAN Xiu-wen¹, CAI Bei-ming¹, CHEN Xiao-shuang¹,
CUI Yi-chong¹, DA Liang-jun¹⁻³

- (1. School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China;
2. Shanghai Key Laboratory for Ecology of Urbanization Process and Eco-restoration, East China Normal University, Shanghai 200241, China;
3. Tiantong National Station of Forest Ecosystem, Chinese National Ecosystem Observation and Research Station, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: Leaf mass based nitrogen (N_{mass}) and phosphorus (P_{mass}) concentrate were measured for three annual weeds, *Setaria viridis*, *Echinochloa crusgalli* and *Eclipta prostrata* which are widely distributed from urban areas to rural areas in Shanghai. The differences of N_{mass} and P_{mass}

收稿日期:2014-04

基金项目:国家自然科学基金(40971041)

第一作者:段秀文,女,硕士研究生,研究方向为城市生态学. E-mail: dxw1004@163.com.

通信作者:达良俊,男,教授,博士生导师,研究方向为城市生态学和植被生态学.

E-mail: ljda@des.ecnu.edu.cn.

among three urban gradients were compared for each species and were related with the total nitrogen (Soil_N) and phosphorous (Soil_P) concentrate in soil. The results indicated that: ① N_{mass} of all annual weeds was significantly increased from urban areas to rural areas, but P_{mass} did not show significant variation. ② For each species, *S. viridis* and *E. prostrate* showed a significant increasing tendency of N_{mass} from urban areas to rural areas, while only *S. viridis* showed a significant increasing tendency of P_{mass} . ③ Both of Soil_N and Soil_P showed negative relationships with N_{mass} and P_{mass} . All those results suggested that annual weed could response to urbanization by changing nitrogen and phosphorous concentrate in leaves which might be partly caused by the variation of soil fertility, but species have different strategies in changing N_{mass} and P_{mass} to adapt the urban habitats.

Key words: Shanghai; urbanization; annual weeds; soil total nitrogen and phosphorus

0 引 言

快速城市化进程和高强度人为活动对城市产生剧烈影响^[1,2],使光照、温度、空气和土壤理化性质等环境因子在城市不同区域产生差异^[3,4].依据上海城市化发展程度、城市规划建设以及环境梯度^[5],可将城市划分为“中心城区、郊区和远郊区”的城乡梯度形式^[6].在城乡梯度上,由于人为活动强度(包括汽车尾气排放量、人类有机氮磷输入量)、土地利用类型及氮磷循环方式(氮沉降、有机磷输入)存在差异,这使得氮、磷输入量在城乡梯度上有所变化^[7],并最终导致土壤氮磷的空间格局发生改变^[8].相较于郊区,中心城区较多的化石燃料消费量、汽车尾气排放量,以及其他人为活动产生的颗粒氮含量,使空气中悬浮氮较多,最终致使中心城区土壤污染程度较高^[7],进而抑制土壤微生物的生长.同时,城市化带来的气温、降水和地下水位等环境因素的变化,影响了城市中氮磷的地球化学循环^[9,10];加之水灌溉、施肥、污染排放等人为活动改变了土壤氮磷的投入和输出^[11],因此城市内土壤出现明显的氮磷富集现象^[12,13].

城市化进程改变了植物叶片所含氮磷的分布格局,同时对土壤氮磷的分布也有一定的影响^[14,15].土壤是植物根系吸收氮磷的主要场所^[16,17],因此土壤氮磷与植物叶片氮磷含量之间具有一定关系.城市杂草作为城市三大植被之一^[18],是城市植被的一种特殊类型,在城市生境中呈野生状态分布且可自然更新,并对城市生境异质化做出快速反应,然后通过改变自身形态、生理行为而适应不同的生境^[19].目前,在城乡梯度上的研究多集中在土壤性质的分布特征^[20,21]或杂草的分布格局^[22,23].而在城乡梯度上,研究城市杂草叶片氮磷含量变化与其土壤氮磷含量之间关系的研究在国内较为鲜见.

本研究在上海城乡梯度上,选取能对异质化生境做出快速响应的禾本科、菊科 3 种一年生杂草:狗尾草、稗和醴肠为研究对象,测定杂草叶片氮磷含量的变化特征,并分析杂草叶片氮磷含量变化与土壤氮磷之间的关系,丰富了上海城市杂草生态学研究,揭示了城市化对城市杂草的影响.

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域

上海市位于北纬 $30^{\circ}40' \sim 31^{\circ}53'$,东经 $120^{\circ}51' \sim 122^{\circ}12'$,地处长江三角洲的东缘,属于

亚热带北缘季风气候类型,年平均气温 17.8℃,全年无霜期 241 d,年日照 2 000 h 左右,年平均降雨量 1 457 mm,全年中 60% 的雨量集中于 5—9 月的汛期,境内除西南部零散山丘为残积弱富铝化母质所发育的黄棕壤外,平原地区均为江海河湖不同沉积母质所发育的水稻土、灰潮土和滨海盐土,地下水位较高,一般为 60~80 cm.

1.2 研究方法

1.2.1 实验材料及样地选择

结合田志慧对上海城市杂草区系及分布特征的研究结果^[6],选取上海市 3 种广泛分布的一年生杂草狗尾草、稗和醴肠为对象.于 2011 年秋季(9—11 月,一年生植物相对成熟期)连续一周未雨后进行调查,以上海市人民广场为零基点,按东、南、西、北 4 个方向各设置 1 条宽为 1 km 样带,样带交叉成十字型(见图 1),共设置样点 19 个(其中内环线内 6 个,内外环线之间 6 个,外环线外 7 个),以每个样点为圆心,设置半径 1 km 的区域为调查样区.

选取以 3 种杂草为优势种的群落进行调查,按照群落高度及分布面积的不同,设置 1 m×1 m—5 m×5 m 面积不等的样方进行群落学调查^[6],道路缝隙等特殊生境依据具体带宽设置样段.样方调查中,记录每个群落的总盖度和最大高度;对每个物种,记录物种名、盖度和最大高度.共调查 67 个样方,其中狗尾草群落 39 个、醴肠群落 11 个、稗群落 17 个.

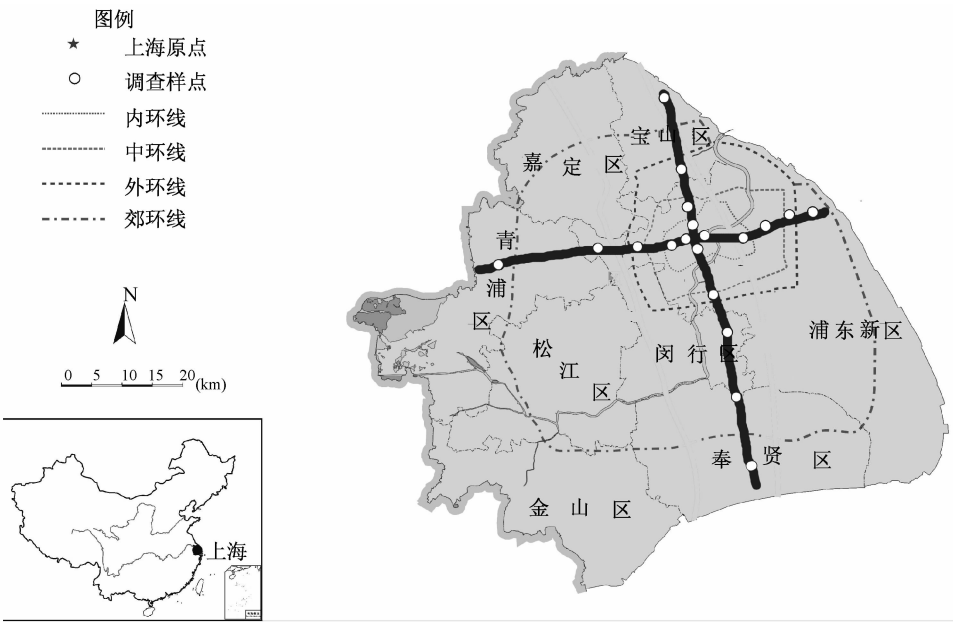


图 1 调查区域及样地示意图

Fig. 1 Location of the study area and the sampling points in Shanghai

1.2.2 土壤氮磷含量和植物叶片氮磷含量测定

于每个样方内随机选取 3 个点,采集 5~15 cm 的土壤样品,装入自封袋,带回实验室,自然风干,混匀后过 60 目筛,采用标准凯氏法进行消解,使用流动注射分析仪(Skalar, Nerthland, 美国).测定土壤总氮(Soil total nitrogen, STN, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)和土壤总磷(Soil total phosphorus, STP, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$).

每一样方中选取对象种,采集 1—3 株成熟个体.对每种所采植物取 10 枚完整成熟且健

康的叶片,将叶片在 65℃下烘干 48~72 h 后研磨.用标准凯氏法进行消解,使用流动注射分析仪测定氮磷含量,之后计算叶片单位质量氮(Leaf nitrogen per mass, N_{mass} , $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)和叶片单位质量磷(Leaf phosphorus per mass, P_{mass} , $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)含量.计算公式如下.

$$N_{\text{mass}}(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}) = m_{\text{N}}/M,$$

(1)

$$P_{\text{mass}}(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}) = m_{\text{P}}/M.$$

(2)

其中, m_{N} 、 m_{P} 、 M 分别为所测得的叶片氮、磷与叶片的质量.

1.2.3 统计分析

采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)和 Tukey’s Test 比较城乡梯度上土壤氮磷、植物叶片单位质量氮磷的分布差异;使用 Pearson 相关性系数分析土壤氮磷与植物叶片单位质量氮磷的相关性.上述分析均在 SPSS 19.0 完成.

2 结果与分析

2.1 城乡梯度的划分

上海城市化进程与城市环形道路的建设具有一致性.研究参照田志慧^[6]对上海市城乡梯度的划分结果,以城市道路环线为界将其划分为 3 个城市化强度不同的区域(见表 1),其中内环线以内为中心城区(U),内环线及外环线之间为郊区(S),外环线以外为远郊(R).

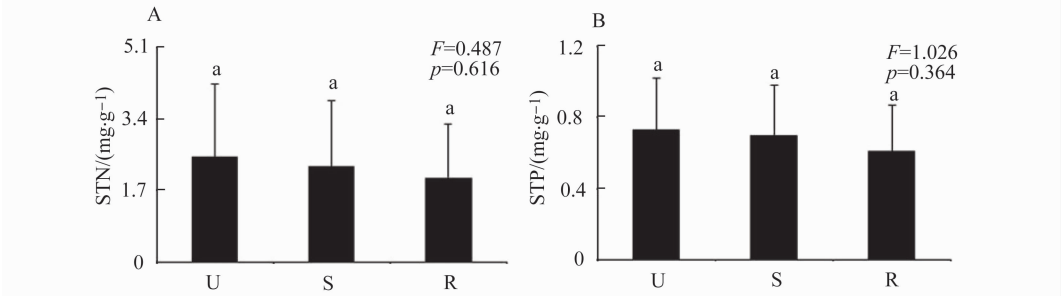
表 1 城乡梯度各区域范围及面积

Tab. 1 Range and area of different region on urban-rural gradient

区域面积/ km^2	范围	区域
中心城区 U	内环线以内	黄浦、卢湾、闸北、虹口、静安、徐汇、普陀、杨浦、浦东新区
郊区 S	内环线—外环线	宝山、杨浦、虹口、闸北、普陀、长宁、徐汇、浦东新区、闵行、嘉定
远郊区 R	外环线以外	宝山、嘉定、青浦、松江、闵行、奉贤、浦东新区、金山

2.2 城乡梯度上土壤氮磷和植物叶片单位质量氮磷的分布特征

在上海城乡梯度上,土壤总氮和总磷含量呈下降趋势,但差异不显著($p>0.05$)(见图 2).

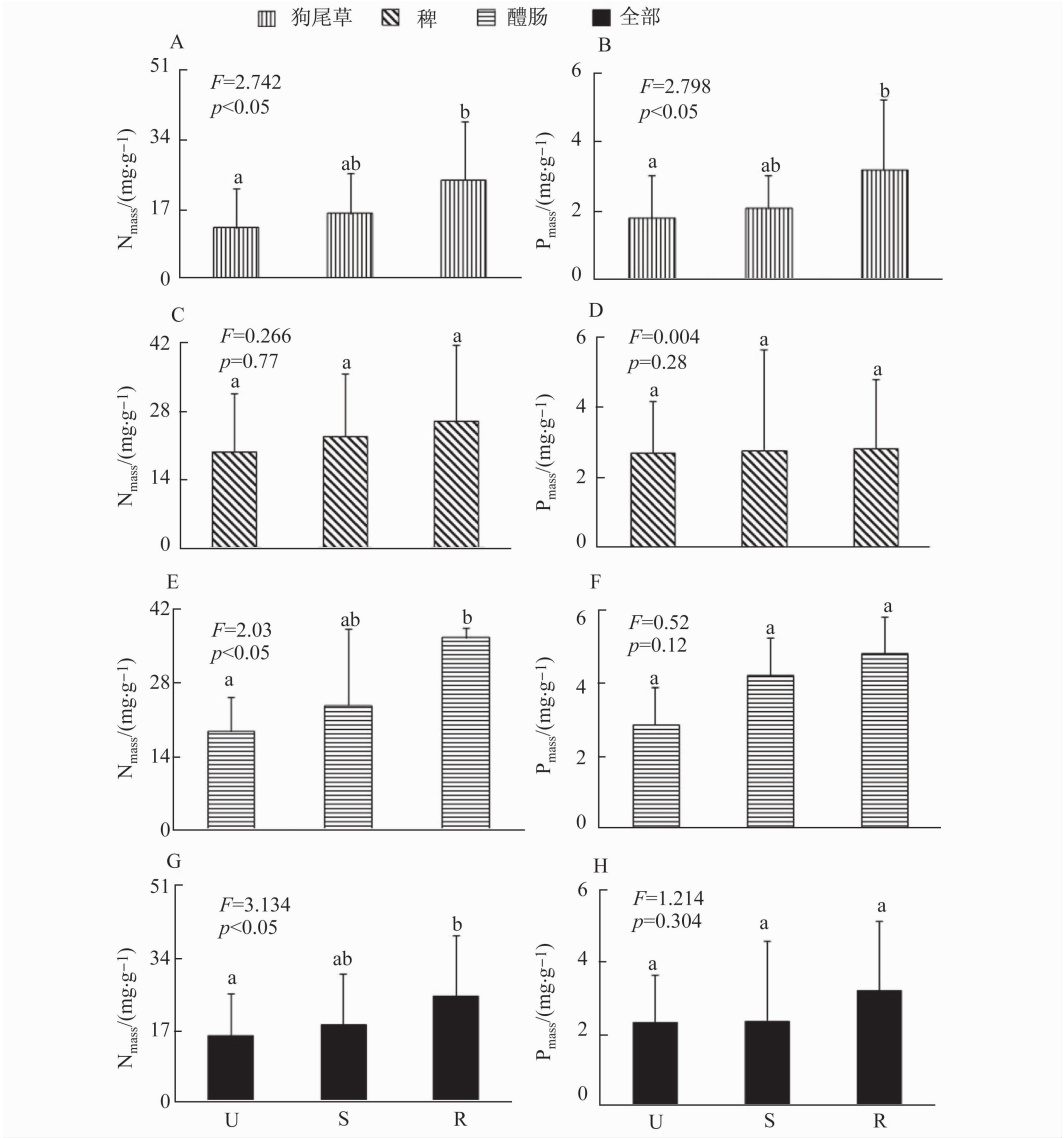


注:STN 和 STP 为土壤总氮和土壤总磷含量;U、S 和 R 分别表示上海的中心城区、郊区和远郊区;
图中数字均为 One-way ANOVA 的检验结果
图 2 城乡梯度上土壤氮磷的分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of soil total nitrogen, soil total phosphorus in the urban-suburban-rural gradient

从中心城区至远郊区,狗尾草、稗与醴肠的单位质量氮含量均呈上升趋势,其中狗尾草与醴肠氮含量显著性增加($p<0.05$),而稗未达显著水平($p>0.05$).同样的,狗尾草、稗与

醴肠的单位质量磷含量呈上升趋势,其中狗尾草磷含量显著性增加($p<0.05$),而稗与醴肠未达显著水平($p>0.05$).将 3 个物种合并计算,发现植物单位质量氮含量在城乡梯度上显著性增加($p<0.05$),而单位质量叶磷虽呈上升趋势,但未达到显著水平($p>0.05$)(见图 3).



注: N_{mass} 和 P_{mass} 分别为单位质量氮和单位质量磷含量;U、S和R分别表示上海的中心城区、郊区和远郊区;

图中数字均为 One-way ANOVA 和 Tukey's Test 的检验结果

图 3 城乡梯度上植物氮磷含量的分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of plant leaf nitrogen per mass, and leaf phosphorus per mass in the urban-rural gradient

2.3 土壤氮磷与植物叶片单位质量氮磷的关系

土壤总氮含量与植物叶片单位质量氮磷间均呈极显著负相关($p<0.01$),土壤总磷与植物叶片单位质量氮呈极显著负相关($p<0.01$),与植物叶片单位质量磷显著负相关($p<$

0.05)(见表 2).

表 2 土壤氮磷与植物叶片单位质量氮磷间的相关性

Tab.2 The relationship between soil total nitrogen, soil total phosphorus and leaf nitrogen per mass, leaf phosphorus per mass

	$N_{\text{mass}}/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$P_{\text{mass}}/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$
STN/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	- 0.478 **	- 0.382 **
STP/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	- 0.366 **	- 0.293 *

注: * 表示 $p<0.05$, ** 表示 $p<0.01$

3 讨 论

3.1 土壤氮磷与城市杂草叶片氮磷含量的关系

研究表明植物所含氮、磷主要来源于土壤^[16,17],土壤氮、磷含量的高低决定了植物体的氮、磷含量. 本研究中,在种间水平上,3 种一年生杂草的叶片氮、磷含量与土壤总氮、总磷含量显著负相关(见表 2). 进一步在种内水平上,针对同一物种的分析也表现出相似的结果,即:狗尾草和稗的叶片氮含量与土壤总氮含量均负相关,醴肠则无显著性关系.

Ordenez 等人利用全球 97 个地点的 645 个物种数据分析的土壤肥力与叶片氮、磷含量关系时指出,叶片氮含量与土壤总氮含量呈负相关,但与氮的矿化速率呈正相关^[25],表明土壤中有效态氮素是影响植物叶片氮含量的决定因素. 同时该研究指出,植物叶片磷含量随与土壤总磷含量相关,但此关系受到降水量的影响,亦表明土壤中可吸收态磷素对植物叶片磷含量有直接作用. 因而,土壤总氮磷含量与叶片氮磷含量的关系受到其他因素的影响,两者之间的关系并不紧密,这与顾大形等人对四季竹叶片氮磷化学计量特征与土壤氮磷之间的研究结果吻合^[26].

3.2 城市化对杂草叶片氮磷含量的影响

本研究中一年生杂草的叶片氮磷含量在城乡梯度上呈现出:从中心城区至远郊区一年生杂草单位质量叶片氮含量显著性增加($p<0.05$),而单位质量叶片磷含量有上升趋势,但未达显著水平($p>0.05$)(见图 3);土壤总氮磷含量在城乡梯度上无显著差异,与在美国凤凰城(CAPLTER)得到的研究结果“城市中的氮含量显著高于城市周围沙漠区域”不同^[27,28].

植物所含氮磷主要来源于植物根系从土壤中吸收氮磷^[16,17]. 相关研究表明,土壤总氮磷供应充足的条件下,植物叶片存在对氮磷的奢侈吸收^[26]. 本文中土壤氮磷在城市化梯度上没有明显变化,郊区植物从土壤中吸收氮磷越多,使植物单位质量氮磷含量增加,因此滞留在土壤中的氮磷含量就越少,致使一年生杂草叶片单位质量氮、磷含量和土壤总氮、总磷显著负相关,即土壤氮磷在中心城区、郊区和远郊区未有显著性差异,而狗尾草与醴肠的单位质量氮含量显著性增加.

许多研究表明,交通路段土壤更容易受到环境污染影响,污染物不仅包含汽车尾气排放,还包含轮胎磨损物、刹车片、轴承及道路建筑材料以及再悬浮的土壤^[29,30],其中汽车尾气中的铅污染会使土壤性质发生改变^[31]. 上海中心城区的土壤重金属污染较郊区、远郊区严重,重金属的累积会抑制土壤中微生物的生命活动,最终影响植物对氮磷的吸收^[20]. 土壤污染物浓度的增加和人为扰动的增加,降低了土壤中的微生物含量和活力,降低了土壤氮磷的矿化速率,使得土壤氮中可供植物直接吸收的形态含量降低^[20];此外伴随城市化而来的各类环境变迁,如城市热岛的出现,致使城市内温度升高、降雨减少^[2],加之城市内建筑群和

硬质化地面铺装的不断增加,使中心城区的土壤通气条件变差,这些均影响了土壤氮的地化循环过程^[32,33].因而城市区域在土壤总氮磷含量不变,甚至增加的情况下,土壤中植物可利用的氮磷含量可能降低,最终导致杂草叶片氮磷含量偏低.

土壤中磷的存在形式为水溶态、吸附态和矿物态 3 种形式,其中石灰性土壤中磷酸钙盐的比重较大,吸附态和水溶态所占比例较小,且与土壤含水量密切相关^[34].当干旱程度增加时,水溶态磷会向吸附态磷转化,因中心城区热岛效应产生的温度升高,土壤旱化,使土壤中水溶态磷含量降低,进而影响植物对土壤磷的吸收利用^[34,36];土壤中的有机磷主要来自于植物,也有一部分来自于土壤微生物^[37,38],由于城市内中心城区较远郊区的交通路污染较多、土地的硬质化程度较大及人为清洁干扰程度较大,这样不仅减少了植物的枯枝落叶的分解,更影响了土壤中微生物的生长;城市内土壤总磷含量较高,但是有机形态的磷占表土全磷的比例则较低^[34],因此供植物吸收的有效磷含量不足而限制植物对磷的吸收,进而影响植物对氮的吸收.故在城乡梯度上,从中心城区至远郊区植物单位质量叶片氮含量呈显著性增加.植物能通过把衰老组织中的磷向生长组织转移,进行元素的再分配,以提高磷的利用效率^[39,40],因此在城乡梯度上植物单位质量叶片磷含量差异不显著.

[参 考 文 献]

[1] ZHAO S Q,DA L J,TANG Z Y,et al. Ecological consequences of rapid urban expansion: Shanghai,China[J]. Frontiers in Ecology and the Environment,2006, 4(7):341-346.

[2] ZHANG K X,WANG R,SHEN C C,et al. Temporal and spatial characteristics of the urban heat island during rapid urbanization in Shanghai,China[J]. Environmental monitoring and assessment,2010,169:101-112.

[3] ROBERT L W,GEOGRE L W P. Climate change,biodiversity and the urban environment: a critical review based on London,UK[J]. Progress in Physical Geography,2006,30:73-98.

[4] WANG J Y,DA L J,SONG K ,et al. Temporal variations of surface water quality in urban,suburban and rural areas during rapid urbanization in Shanghai, China[J]. Environmental Pollution,2008,152:387-393.

[5] MOONEY H A,HOBBS R J. Invasive Species in a Changing World[M]. Washington:Island Press,2000.

[6] 田志慧. 上海城乡陆生生态系统杂草群落多样性格局及其成因论研究[D]. 上海:华东师范大学,2011.

[7] DOUGLAS A,BURNS. The effects of atmospheric nitrogen deposition in the Rocky Mountains of color ado and southern Wyoming,US-a critical review[J]. Environmental Pollution,2004,127:257-269.

[8] POUYAT R V,GROFFMAN P M,YESILONIS I,et al. Soil carbon pools and fluxes in urban ecosystems[J]. Environment Pollution,2002,116(3):107-118.

[9] REKOLAINEN S,SALT C A,BARLUND I,et al. Impacts of the management of radioactively contaminated land on soil and phosphorus losses in Finland and Seotland Water[J]. Air and Soil Pollution,2002,139:115-136.

[10] 卢瑛,龚子同,张甘霖. 城市土壤磷素特征及其浅层地下水磷浓度的关系[J]. 应用生态学报,2001,12(5):735-738.

[11] ZHANG M K. Phosphorus accumulation in soils along an urban-rural land use gradient in Hangzhou southeast, China[J]. Communications in Soils and Plant Analysis,2004,35:819-83.

[12] 李茜. 南昌城乡梯度森林土壤磷形态时空分布格局[D]. 南昌:南昌大学,2010.

[13] STROGANOVAM N. Soils of Moscow and Urban Environment [J]. Russian Federation,1998,1-177.

[14] POUYAT R V,YESILONIS I D,RUSSELL A J,et al. Soil chemical and physical properties that differentiate urban land-use and cover types[J]. Soil Science Society of America Journal,2007,7(1):1010-1019.

[15] KOERNER A B,KLOPATEK M J. Carbon fluxed and nitrogen availability along an urban-rural gradient in a desert landscape[J]. Urban Ecosystems,2010,13(1):1-21.

[16] CHAPIN F S. Plant responses to multiple environmental factors[J]. Bioscience,1987,37(1):49-51.

[17] HE J S,FANG J Y,WANG Z H,et al. Stoichiometry and large-scale patterns of leaf carbon and nitrogen in the

- grassland biomes of China[J]. *Ecologic*, 2006, 149, 115-122.
- [18] OHSAWA M, DA L J, OTUKA T. Urban vegetation - Its structure and dynamics[C]// OBARA H. *Integrated Studies in Urban Ecosystems as the Basis of Urban Planning*, [S. L.]:[s. n.], 1988.
- [19] CILLIERS S S, BREDEKAMP G J. Vegetation of road verges on an urbanization gradient in Potchefstroom, South Africa[J]. *Landscape and urban planning*, 2000, 46: 217-239.
- [20] LONG Q, WANG J Y, DA L J. Assessing the spatial-temporal variations of heavy metals in farmland soil of Shanghai, China[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2013, 22(3a): 928-938.
- [21] 陈师, 王效科, 逯非. 城市与郊区森林土壤微生物群落特征差异研究[J]. *土壤通报*, 2012, 43(3): 614-620.
- [22] 刘小丽, 陈晓双, 王伟波, 等. 城乡梯度上哈尔滨城市杂草分布格局及生境型生态种组划分[J]. *城市环境与城市生态*, 2013, 26(3): 22-25.
- [23] 田志慧, 蔡北溟, 达良俊. 城市化进程中上海植被的多样性、空间格局和动态响应(Ⅷ): 上海乡土陆生草本植物分布特征及其在城市绿化中的应用前景[J]. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2011(4): 24-34.
- [24] 唐荣莉, 马克明, 张育新, 等. 北京道路灰尘中污染物含量沿城乡梯度、道路密度梯度的变化特征[J]. *环境科学*, 2013, 34(1): 364-372.
- [25] ORDONEZ JC, BODEGOM PM, WITTE J M, et al. A global study of relationships between leaf traits, climate and soil measures of nutrient fertility[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2009, 18(2): 137-149.
- [26] 顾大彤, 陈双林, 黄玉清. 土壤氮磷对四季竹叶片氮磷化学计量特征和叶绿素含量的影响[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(12): 1219-1225.
- [27] ZHU W X, HOPE D, GRIES C, et al. Soil characteristics and the accumulation of Inorganic nitrogen in an arid urban ecosystem[J]. *Ecosystems*, 2006(9): 711-724.
- [28] HOPE D, ZHU W X, GRIES C, et al. Spatial variation in soil inorganic nitrogen across an arid urban ecosystem[J]. *Urban Ecosystems*, 2005(8): 251-273.
- [29] WONG J W C, MAK N K. Heavy metal pollution in children playgrounds in Hong Kong and its health implications[J]. *Environmental Technology*, 1997, 18(1): 109-115.
- [30] ARSLAN H. Heavy metals in street dust in Bursa, Turkey[J]. *Journal of Trace and Microprobe Techniques*, 2001, 19(3): 439-445.
- [31] 全川, 董艳. 城市生态系统土壤碳库特征[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(10): 1616-1621.
- [32] BREUER L, KIESE R, BUTTERBACH-BAH K. Temperature and moisture effects on nitrification rates in tropical soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002(3): 834-844.
- [33] SUSANA B, FRANCESE S. Factors limiting denitrification in a Mediterranean riparian forest soil[J]. *Biology and Biochemistry*, 2007(10): 2685-2688.
- [34] 张雨瑶, 李世友. 土壤磷与植物关系研究进展[J]. *世界林业研究*, 2013, 26(5): 19-26.
- [35] SCHACHTMAN D P, REID R J, AYLING S M. Phosphorus uptake by plants, from soil to cell[J]. *Plant Physiology*, 1998, 116: 447-453.
- [36] PARFITT R L, ATKINSON R J, SMART R S C. The mechanism of phosphate fixation by iron oxides[J]. *Soil Science Society of American Proceedings*, 1975, 39: 837-841.
- [37] 尹逸宵, 华路, 张振贤, 等. 土壤中磷素的有效性及其循环转化机制研究[J]. *首都师范大学学报*, 2005, 26(3): 95-101.
- [38] GRANT C, BITTMAN S, MONTREAL M, et al. Soil and fertilizer phosphorus: effects on plant P supply and mycorrhizal development[J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 2005, 85(1): 3-14.
- [39] GEORGE C, ANDRE L. Phosphorus efficiency and phosphate-Iron interaction in maize[J]. *Agronomy Journal*, 1985, 77(3): 399-403.
- [40] GSTDINER D T. Characterization of phosphorus efficiencies of two winter wheat cultivars[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1990, 54(5): 1331-1340.