

巨桉人工林下土壤团聚体分形特征及碱解氮分布研究

王春燕¹, 谢贤健², 周贵尧³, 温丁⁴, 梁玉芳⁵, 吕瑜良¹

(1. 西南大学 地理科学学院, 重庆 400715;

2. 内江师范学院 地理与资源科学学院, 四川 内江 641000; 3. 江苏大学 农业工程研究院, 江苏 镇江 212013;

4. 中国科学院大学 地理科学与资源研究所, 北京 100049; 5. 辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要:了解川中丘陵区巨桉林土壤团聚体分形特征及碱解氮含量状况对于掌握该地区巨桉种植对土壤稳定性及土壤养分的影响十分必要。该研究以典型川中丘陵区 3.5 a 生巨桉纯林、巨桉+果树、巨桉+粮食作物土壤为研究对象,以弃耕地土壤为对照,应用分形模型,分析了土壤团聚体分形特征及不同粒径团聚体对土壤碱解氮分布的影响。结果表明:土壤团聚体数量随着粒径的增大呈现出先减少再增加后减少的趋势,其中 2~5 mm 粒径团聚体在土壤结构中占有重要地位;土壤分形维数排序为:弃耕地>纯林>林果>林粮;土壤碱解氮含量排序为:弃耕地>林粮>林果>纯林,巨桉林地较弃耕地土壤分形维数和碱解氮含量低,说明巨桉的栽培在有利于保持土壤水土流失的同时却造成了土壤养分流失和地力衰退;巨桉林地土壤碱解氮集中分布在<0.25 mm 和 0.25~0.5 mm 粒径的细砂和中砂砾中;相关分析表明,土壤碱解氮含量与 0.25~0.5 mm 团聚体碱解氮含量呈负相关,与 2~5 mm 团聚体碱解氮含量呈显著正相关。该研究结果科学评价了巨桉种植对土壤结构和养分的影响,为川中丘陵区土壤的水土保持和肥力维护工作提供了合理的经营模式。

关键词:巨桉人工林;土壤团聚体;分形维数;碱解氮

中图分类号:S152.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)03-0088-05

Fractal Features of Soil Aggregates and Distribution of Alkaline Hydrolytic Nitrogen in Different Types of *Eucalyptus grandis* Plantations

WANG Chunyan¹, XIE Xianjian², ZHOU Guiyao³, WEN Ding⁴, LIANG Yufang⁵, LÜ Yuliang¹

(1. College of Geographical Science, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. School of Geography and Resources Science, Neijiang Normal University, Neijiang, Sichuan 641000, China; 3. Institute of Agriculture Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5. College of Mine Technology and Engineering, Liaoning Engineering Technology University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: Understanding the fractal characteristics of soil aggregates and alkaline hydrolytic nitrogen contents in *Eucalyptus grandis* plantations in the hilly region of Sichuan Basin was necessary to know the impact of *Eucalyptus grandis* plantations on soil stability and soil nutrient in this region. In this study, soils covered by 3.5-year pure *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus grandis* + fruits and *Eucalyptus grandis* + grain crops modes were selected as research examples, while abandoned farmland was taken as the control. Fractal theory was used as analytical method to investigate the fractal characteristics of soil aggregates and distribution of alkaline hydrolytic nitrogen content influenced by soil aggregates. Results showed that contents of soil aggregates presented the trend of increase first and decrease later with the decrease of soil aggregate sizes, the soil aggregates with 2~5 mm size played an important role in soil structure. Soil fractal dimension followed the sequence of abandoned farmland>*Eucalyptus grandis* + grain crops>*Eucalyptus grandis* + fruits>pure *Eucalyptus grandis*, while alkaline hydrolytic nitrogen contents in soil aggregates followed the trend of abandoned farmland>*Eucalyptus grandis* + grain crops>*Eucalyptus grandis* + fruits>pure *Eucalyptus grandis*. Both soil fractal value and the alkaline hydrolytic nitrogen content of *Eucalyptus grandis* plantations were lower compared with abandoned farmland, indicating that *Eucalyptus grandis* growth

would contribute to control soil erosion and cause losses of soil nutrients and fertility. Content of alkaline hydrolytic nitrogen mainly concentrated in fine sand and gravel with diameters of <0.25 mm and $0.25\sim 0.5$ mm. Correlation analysis indicated that soil alkaline hydrolytic nitrogen contents had a negative correlation with those soils aggregates with $0.25\sim 0.5$ mm size, significantly positively correlated with those with $2\sim 5$ mm size. The study scientifically evaluated the impact of *Eucalyptus grandis* plantations on soil structure and nutrients, providing a reasonable management model for soil and water conservation and fertility maintenance in the hilly region of Sichuan Basin.

Keywords: *Eucalyptus Grandis* plantations; soil aggregates; fractal dimension; alkaline hydrolytic nitrogen

土壤团聚体是土壤结构构成的基础,是土壤中物质和能量转化及代谢的场所,其数量和质量直接决定土壤质量和肥力^[1]。土壤是一种具有自相似结构的多孔介质^[2],是具有分形的系统,不同大小团聚体间存在一定的自相似性。土壤分形维数与土壤团聚体组成存在明显对应关系^[3],并且,分形维数能客观反映土壤结构形状和土壤肥力特征^[4]。因此,在土壤团聚体研究中,分形理论被广泛利用。氮是调节陆地生态系统生产量、结构和功能的关键性元素^[5],能够限制群落初级和次级生产量^[6]。同时,氮素是作物生长所必需的大量营养元素之一,土壤中氮素的丰缺及供给状况直接影响着农作物的生长水平^[7]。土壤碱解性氮也称土壤有效性氮,是铵态氮、硝态氮、氨基酸、酰胺和易水解的蛋白质氮的总和,是土壤氮素的重要组成部分,其含量与土壤有机质呈正相关,能较好反映出近期内土壤氮素的供应状况,在衡量土壤氮素供应水平上占有重要地位^[8]。因此,关于土壤碱解氮的研究分别涉及到农田、森林、湿地等生态系统^[9-11],对于其空间分布和采样点数量合理性的研究也得到了关注^[12]。关于土壤团聚体结构与土壤养分效应的研究表明,土地利用方式^[13]、耕作方式^[14]、施肥方式^[15-16]、以及生态恢复措施^[17]的不同都将对土壤碱解氮的含量及其土壤团聚体的分布造成影响,也有学者研究季节变化对氮素在土壤团聚体中分布的影响^[18]。已有研究成果都具有明显的地域色彩,且专门研究土壤团聚体结构与土壤碱解氮关系的报道还十分少见。

巨桉(*Eucalyptus grandis*)是桃金娘科桉属的优良速生用材树种,木材材质较软、易劈裂、纹理通直,普遍用于纸浆、锯材、纤维板、木片以及薪材、矿柱材等,具有较高商品价值。自然分布于澳大利亚东南部沿海地带,主要集中于南纬 $25^{\circ}\sim 33^{\circ}$ 。自1986年在四川首次进行巨桉引种试验并于1992年推广以来,巨桉以其适应性和经济性状成为了四川桉树栽培的主要树种之一。我国在80年代中期开展系统的种源试验,随后在育苗、土壤肥力、无性系繁殖、抗寒性、材性、遗传变异及经营数表编制方面开展了大量的应

用研究^[19]。有些学者认为桉树的栽培造成了一系列的生态问题,如出现种植地力衰退,土壤抗蚀性下降、生物多样性降低、水土保持能力下降等多种问题^[20]。而有些学者则认为桉树人工林能在改善土体结构和提高土壤肥力上发挥其生态功能^[21]。因此,本文以典型川中丘陵区巨桉不同林地土壤为研究对象,基于试验数据,应用分形函数,研究其土壤团聚体结构分形特征及其碱解氮含量分布特点,旨在为巨桉林地养分和生态效益研究提供参考。

1 研究区概况

研究区位于四川省内江市东兴区($29^{\circ}58.705'N$, $105^{\circ}06.759'E$),海拔 $200\sim 400$ m,地貌类型以中低山丘陵为主,是典型的川中丘陵地貌。气候属于亚热带湿润气候区,1月平均气温 $5\sim 7^{\circ}C$,7月平均气温 $25\sim 27^{\circ}C$,全年平均气温 $17\sim 27^{\circ}C$;平均年降水量 $1\,027.7$ mm,其中冬季(10—12月)平均总降雨量 46.3 mm,占全年5%;夏季(6—8月)为全年最集中的季节,平均总降水量 564.8 mm,占全年的55%;春季(3—5月)平均降水量 174.2 mm,占全年的17%;秋季(9—11月)平均总降水量 245.3 mm,占全年的24%,高温期与多雨季节大体一致,使得春夏干旱出现频率较高;无霜期达 330 d。土壤类型为紫色土。

2 研究方法

2.1 样地选取和土样采集

2012年7月,选取研究区3.5 a生巨桉纯林(纯林)、巨桉+果树(林果)、巨桉+粮食作物(林粮)土壤设置样地,弃耕地作为对照。样地基本特征见表1。

表1 样地基本特征

样地	坡度/ /($^{\circ}$)	坡向	密度/ (株 \cdot hm $^{-2}$)	树龄/ 年	林下植被
巨桉纯林	6	东	1650	3.5	禾本科、莎草科、三叶草
林果	9	东南	1300	3.5	柑橘或柠檬
林粮	8	东南	1600	3.5	玉米或红薯
弃耕地	6	西	—	—	—

选择 20 m×20 m 的标准样地,采用 S 型取样方法,避开林边、河边、路边及其他特殊位置,在标准样地中布设 1 m×1 m 的采样单元 5 个。在采样单元内用土砖(直径 4 cm)对 0—30 cm 土壤进行取样。样品在实验室内自然风干,然后沿土壤结构的自然剖面掰分成小团块,剔除石块和残根备用。

2.2 团聚体及碱解氮测定方法

团聚体干筛法对土样进行团聚体含量的测定,将土样分为<0.25,0.25~0.5,0.5~1,1~2,2~5,5~7 mm 六个粒径团聚体。对各粒径团聚体进行碱解氮测定时再分别研磨过 0.25 mm 筛,装密封袋备用。土壤碱解性氮的测量方法主要采用碱解扩散法^[22]。

2.3 分形模型

根据土壤团聚体不同粒径的质量分数,利用杨培岭等^[4]提出的分形模型,计算不同粒径土壤团聚体分形维数 D ,分形关系式如下:

$$(d_i/d_{\max})^{3-D} = m_i/m_{\max} \quad (1)$$

式中: D ——分形维数; d_i ——相邻两粒级的粒径平均值(mm); d_{\max} ——最大土粒的粒径(mm); m_i ——粒径小于 d_i 的累积土粒质量(kg); m_{\max} ——各粒级质量的总和(kg)。

2.4 数据统计分析

运用 Excel 2007 对数据进行基本处理和作图,采用 ANOVA 方法对土壤团聚体组成及其碱解氮含量进行方差分析,并利用 Duncan 法对数据进行多重比较。采用 Pearson 相关统计方法对不同粒径土壤团聚体碱解氮含量与土壤总的碱解氮含量进行相关

分析,得到其相关分析矩阵。以上方法都在 SPSS 13.0 软件中进行。

3 结果与分析

3.1 不同模式下土壤团聚体的分布

由表 2 可知,4 种模式下土壤团聚体数量都随着粒径的增大,呈现出先减少后增加再减少的趋势。不同粒径中以 2~5 mm 团聚体含量所占比例最大,1~2 mm 粒径团聚体含量次之,0.25~0.5 mm 粒径团聚体含量最低,表明 2~5 mm 粒径团聚体在不同模式土壤结构组成中具有重要地位。总体来看,纯林、林果、林粮、弃耕地 4 种模式中<0.25 mm 的微团聚体含量组成都较低,分别为 6.08%,6.07%,5.92%,10.73%,而>0.25 mm 的大粒径团聚体在各模式中的累积百分比分别为:93.92%,93.93%,94.08%,89.27%。方差分析表明,不同模式下土壤各粒径团聚体差异极显著($p < 0.001$),相同粒径团聚体<0.25,0.5~1,1~2 mm 团聚体中纯林、林果、林粮 3 种巨桉林地模式与弃耕地土壤差异显著,而 3 种巨桉林地模式之间差异不显著;0.25~0.5 mm 团聚体中纯林与林果、林粮差异不显著,而和弃耕地差异显著;2~5 mm 团聚体中纯林、林果与弃耕地存在显著差异,林粮与弃耕地不存在显著差异,林果与林粮也不存在显著差异;5~7 mm 团聚体中 4 种模式之间差异不明显。这表明巨桉的种植导致了<0.25,0.5~1,1~2,2~5 mm 团聚体含量的显著减少,且 2~5 mm 粒径团聚体对土地利用模式的变化反映最为敏感。

表 2 不同模式下土壤团聚体组成

土地模式	<0.25 mm	0.25~0.5 mm	0.5~1 mm	1~2 mm	2~5 mm	5~7 mm
纯林	5.92b	3.28b	10.46b	22.70b	29.95c	14.97a
林果	6.07b	3.82ab	11.03b	23.12b	33.97bc	16.22a
林粮	6.07b	3.88ab	11.26b	26.46b	35.32ab	17.02a
弃耕地	10.73a	5.09a	13.74a	31.53a	40.02a	17.27a

注:不同小写字母代表数值间具有显著差异,下表同。

3.2 不同模式下土壤团聚体的分形特征

由表 3 可见,4 种模式土壤粒径团聚体分形维数为 2.199 7~2.376 8,顺序为弃耕地>纯林>林果>林粮。土壤团聚体粒径分布的分形维数愈小,则土壤愈具有良好的结构与稳定性^[14],因此纯林、林果、林粮模式下的土壤结构优于弃耕地,巨桉的栽培更有利于维持土壤稳定性。此外,土壤分形维数是反映土壤结构几何形体的参数,在维数上表现出黏粒含量越高,质地越细,分形维数越高^[4]。由于巨桉林地相较于弃耕地,其枝叶的分布和地表掉落覆盖物的增加,可以防止雨滴对土粒的分散,其根系布的增多也使土

体紧实度增加,黏粒含量减少,从而降低了土壤的分形维数。

表 3 不同模式下土壤粒径团聚体分形维数

土地模式	回归方程	相关系数 R^2	斜率 K	分形维数 D
纯林	$y=0.789x+0.109$	0.980	0.790	2.210
林果	$y=0.793x+0.098$	0.976	0.791	2.208
林粮	$y=0.800x+0.138$	0.965	0.800	2.199
弃耕地	$y=0.623x+0.069$	0.982	0.623	2.377

3.3 不同模式下土壤团聚体中碱解氮含量比较

4 种土地模式下,土壤碱解氮含量弃耕地>林粮>林果>纯林(表 4)。不同粒径中,土壤碱解氮相对

集中分布在 $<0.25, 0.25\sim 0.5$ mm 粒径的细砂和中砂砾中,在此粒径中各模式碱解氮平均含量分别达到了27.21,25.62 mg/kg,且土壤碱解氮含量随着土壤团聚体粒径的增大呈现出先减少再增加的趋势。在同一粒径下, $<0.25, 0.25\sim 0.5, 1\sim 2, 5\sim 7$ mm 团聚

体平均碱解氮含量差异不显著,而在 $0.5\sim 1$ mm 团聚体中纯林较弃耕地碱解氮含量显著降低($p<0.05$),在 $2\sim 5$ mm 团聚体中纯林较林粮和弃耕地碱解氮含量显著降低($p<0.05$),这说明巨桉的栽培显著降低土壤 $0.5\sim 1, 2\sim 5$ mm 粒径团聚体的碱解氮含量。

表4 不同模式下土壤团聚体中碱解氮含量比较

土地模式	mg/kg					
	<0.25 mm	$0.25\sim 0.5$ mm	$0.5\sim 1$ mm	$1\sim 2$ mm	$2\sim 5$ mm	$5\sim 7$ mm
纯林	23.91a	22.55a	17.20b	17.88a	15.16b	21.89a
林果	27.46a	25.96a	23.49ab	20.49a	19.90ab	24.70a
林粮	28.38a	26.04a	26.58ab	22.43a	26.12a	26.50a
弃耕地	29.18a	27.92a	30.62a	24.90a	26.55a	28.54a

3.4 不同粒径土壤团聚体对土壤碱解氮含量的影响
土壤碱解氮含量与 $0.25\sim 0.5$ mm 团聚体碱解氮含量负相关,与其他粒径团聚体碱解氮含量正相关,其

中与 $2\sim 5$ mm 团聚体土壤碱解氮含量显著正相关,说明 $2\sim 5$ mm 团聚体中土壤碱解氮含量能客观表征巨桉人工林土壤总体碱解氮含量的高低(表5)。

表5 不同粒径土壤团聚体碱解氮与土壤碱解氮含量的相关性

项目	<0.25 mm	$0.25\sim 0.5$ mm	$0.5\sim 1$ mm	$1\sim 2$ mm	$2\sim 5$ mm	$5\sim 7$ mm	碱解氮含量
<0.25 mm	1						
$0.25\sim 0.5$ mm	-0.827	1					
$0.5\sim 1$ mm	0.584	-0.479	1				
$1\sim 2$ mm	0.653	-0.525	0.996**	1			
$2\sim 5$ mm	0.658	-0.164	0.661	0.701	1		
$5\sim 7$ mm	0.732	-0.223	0.437	0.501	0.943*	1	
碱解氮含量	0.716	-0.326	0.839	0.870	0.961*	0.848	1

注: **表示极显著水平 $p<0.01$; *表示显著水平 $p<0.05$; $n=4$ 。

4 结论与讨论

团聚体的数量和大小是决定土壤侵蚀、压实、板结等物理过程速度和幅度的关键指标,它不仅在维持土地生产力方面具有重要作用,而且与土壤的抗蚀能力及环境质量具有密切关系^[23-25]。本研究中,4种模式下土壤团聚体的数量都随着粒径的增大呈现出先减少后增加再减少的趋势,这与以往对该区域的研究结果一致^[26]。此外,本研究在相同粒径下对各模式土壤团聚体含量进行差异分析,结果表明巨桉林地除 $5\sim 7$ mm 粒径团聚体与弃耕地土壤差异不显著外,其他各粒径团聚体含量都存在差异,特别是在 $2\sim 5$ mm 粒径团聚体中,巨桉纯林土壤团聚体含量较林粮和弃耕地显著降低,这充分说明了巨桉种植造成了土壤结构的改变,尤其表现在 $2\sim 5$ mm 粒径团聚体中,这可能是由于 $2\sim 5$ mm 团聚体较其他团聚体所占比例最大。这些都说明了土壤 $2\sim 5$ mm 粒径团聚体在土壤结构中占有重要地位,该粒径团聚体对土地利用方式变化具有较强的敏感性,可以作为巨桉林地结构变化的可靠表征。土壤中 <0.25 mm 粒径的微团聚体,具有抵抗机械破坏和调节土壤水、肥、气、热以及生物活动多种功能,其数量和组合是构成土壤肥力的

实质^[27],是形成各种团聚体特别是团粒结构的基础,对土壤结构稳定性意义重大^[28]。而 >0.25 mm 团聚体的比例能反映不同耕作措施下土壤结构的稳定性状况,本研究中,3种巨桉林地模式下 <0.25 mm 的微团聚体组成比例较弃耕地所占比例小,相反 >0.25 mm 的大粒径团聚体累积含量更大。此外对4种模式土壤碱解氮含量排序为弃耕地 $>$ 林粮 $>$ 林果 $>$ 纯林。说明3.5 a 生巨桉的种植在有利于土壤稳定性,抵抗土壤机械破坏,防止水土流失的同时确实造成了土壤碱解氮流失和地力衰退。

从土壤分行维数来看,分形维数反映了土壤团聚体的组成特征,同时可反映土地利用及土地管理对土壤的影响^[28]。分形维数越低,表征了相对越松散、通透性越好的土壤结构性状^[29]。同时,团聚体粒径分布的分形维数越小,则土壤越具有良好的结构与稳定性^[14]。本研究中不同模式下土壤团聚体的分形维数排序为弃耕地 $>$ 纯林 $>$ 林果 $>$ 林粮,由此看出相对于弃耕地,巨桉的栽培导致了土壤团聚体分形维数的减小,有利用土壤形成良好的土体结构,增强土壤稳定性。但是巨桉纯林模式的土壤结构效益要低于林果和林粮模式,因此可以得出结论,巨桉在川中丘陵区的种植要注重与果树和粮食作物的结合,其中巨桉与

粮食作物的结合是本地区最优的土地利用模式。徐柳斌等^[30]认为,天然林原始植被被伐倒大面积种植桉树后土壤理化性质破坏严重,土壤板结,通气透水能力下降,致使桉树林下土壤物理性质退化。但是林果和林粮模式的结合,尤其是林粮模式由于人为的经常性翻耕,极大地减缓了土壤结构的板结,在充分发挥巨桉林地防止水土流失的优势下,又能促使土壤结构的优化和稳定性的增加。因此,巨桉可以作为川中丘陵区退耕还林主要树种之一。

本研究中,土壤碱解氮含量在各粒径团聚体的分布各有差异,3种林地模式下,土壤碱解氮相对集中分布在 $<0.25\text{ mm}$ 和 $0.25\sim 0.5\text{ mm}$ 粒径的细砂和中砂砾中,土壤碱解氮含量随着土壤团聚体粒径的增大呈现出先减少再增加的趋势,这与石箭华等^[31]对滇中区植被土壤的研究结果一致,这主要与团聚体的比面积有关,小粒径团聚体比面积较大,有较强的保存和吸附氮养分的能力,随土壤团聚体增大,对碱解氮吸附量也减小。因此,土壤团聚体粒径越小,其供氮能力越强。相同粒径条件下, $2\sim 5\text{ mm}$ 团聚体中纯林与林粮、弃耕地碱解氮含量差异显著,说明巨桉的栽培对土壤 $2\sim 5\text{ mm}$ 粒径团聚体的碱解氮性质影响较大。对不同粒径团聚体碱解氮含量与土壤碱解氮含量做相关性矩阵分析得出,土壤碱解氮含量与 $0.25\sim 0.5\text{ mm}$ 团聚体碱解氮含量呈负相关趋势,主要原因是 $0.25\sim 0.5\text{ mm}$ 团聚体在4种模式中占有的组分较低,使得对土壤碱解氮含量的贡献率低,这与邵明安等^[15]的研究成果一致。此外,土壤碱解氮含量除与 $0.25\sim 0.5\text{ mm}$ 团聚体碱解氮呈负相关外,与其他粒径团聚体碱解氮含量都呈正相关,且其正相关系数都较高,在 $0.716\sim 0.961$ 之间波动,特别是与 $2\sim 5\text{ mm}$ 团聚体土壤碱解氮含量显著正相关,说明 $2\sim 5\text{ mm}$ 团聚体中土壤碱解氮的含量可以客观表征巨桉人工林土壤总体碱解氮含量的高低水平。

由于本研究以3.5 a生巨桉林地造林初期土壤为研究对象,所得结果只能表示造林初期巨桉对土壤造成的影响。张丹桔等^[32]分3个年龄序列研究巨桉林生物多样性变化,结果显示不同年龄序列巨桉林生物多样性具有不同的表现,植物和土壤动物的物种数、密度和多样性指数及土壤微生物量呈相似变化趋势,即轮伐期前(4 a左右)降低,此后随林龄显著增加。生物多样性的变化必然导致土壤结构和土壤养分的变化。本研究处于巨桉林造林初期,可能由于该时期原有耕作、施肥等措施以及树木本身生长特性和一些人为因素的影响造成土壤结构的变化和肥力的流失。因此今后对巨桉林地土壤结构及其生态效益

的研究要结合更长时间尺度,综合造林前的土地利用方式、造林目的等因素进行综合分析。

参考文献:

- [1] 彭新华,张斌,赵其国.土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J].土壤学报,2004,41(4):618-623.
- [2] 胡云锋,刘纪远,庄大方,等.不同土地利用/土地覆盖下土壤粒径分布的分维特征[J].土壤学报,2005,42(2):336-339.
- [3] 刘金福,洪伟.不同起源格式柵林地的土壤分形特征[J].山地学报,2001,19(6):565-570.
- [4] 杨培岭,罗远培,石元春.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J].科学通报,1993,38(20):1896-1899.
- [5] Nasholm T, Ekblad A, Nordin A, et al. Boreal forest plants take up organic nitrogen[J]. Nature, 1998, 392(6679):914-916.
- [6] Dormaar J F, Smoliak S, Willms W D. Distribution of nitrogen fractions in grazed and ungrazed fescue grassland Ah horizons[J]. Journal of Range Management, 1990, 43(1):6-9.
- [7] 王夏晖,刘军.不同施肥方式下土壤氮素的运移特征研究[J].土壤通报,2002,33(3):202-206.
- [8] 晁逢春.氮对烤烟生长及烟叶品质的影响[D].北京:中国农业大学,2003.
- [9] 施春键,庄秋丽,李琪,等.东北地区不同纬度农田土壤碱解氮的剖面分布[J].生态学杂志,2007,26(4):501-504.
- [10] 张振明,宋思铭,吴海龙,等.森林土壤碱解氮和全磷空间分布规律[J].东北林业大学学报,2011,39(5):77-80.
- [11] 吕国红,周广胜,周莉,等.盘锦湿地芦苇群落土壤碱解氮及溶解性有机碳季节动态[J].气象与环境学报,2006,22(4):77-80.
- [12] 张忠启,于法展,李保杰.土壤碱解氮空间变异与合理采样点数量研究[J].水土保持研究,2013,20(2):59-63.
- [13] 郑郁,李占斌,李鹏,等.金沙江干热河谷区不同土地利用方式下的土壤特性分异特征[J].水土保持研究,2010,17(1):174-177.
- [14] 黄小娟,郝庆菊,袁雪.耕作方式对紫色水稻土微团聚体分形特征影响的研究[J].中国农学通报,2012,28(6):97-102.
- [15] 孙天聪,李世清,邵明安.长期施肥对褐土有机碳和氮素在团聚体中分布的影响[J].中国农业科学,2005,38(9):1841-1848.
- [16] 罗世琼,杨宇虹,晋艳,等.长期培肥对烤烟—小麦轮作红壤各级团聚体氮及其酶活性的影响[J].水土保持学报,2012,26(4):127-132.
- [17] 张国华,张展羽,王倪进,等.南方红壤丘陵区不同生态恢复措施对土壤质量的影响[J].水利水电科技进展,2007,27(5):19-22.

利用程度由 240.24 变化到了 249.36;土地利用转化速率较快,其综合动态度由 0.36 变化到 0.51;不同土地利用类型的变化速率(单一动态度)有所差异,其中耕地、建设用地的变化最为显著。

(3) 经济发展、人口增长与农业发展是研究区土地利用变化的主要驱动因素,此外研究区内资源禀赋和区位条件的特殊性导致对建设用地的需求量急剧增大,迫使土地利用结构做出调整。

参考文献:

- [1] 李宝杰,顾和和,纪亚洲. 矿区土地复垦景观格局变化和生态效应[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 251-256.
- [2] 徐嘉兴,李钢,陈国良. 基于 Logistic 回归模型的矿区土地利用演变驱动力分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 247-255.
- [3] 侯鹏,王桥,王昌佐,等. 流域土地利用/土地覆被变化的生态效应[J]. 地理研究, 2011, 30(11): 2092-2098.
- [4] 刘洁,李宏,马勇刚. 基于 CA-Markov 模型的中亚典型城市土地利用变化预测分析[J]. 水土保持研究, 2014, 21(3): 51-53.
- [5] 肖思思,吴春笃,储金字. 1980—2005 年太湖地区土地利用变化及驱动因素分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(23): 1-5.
- [6] 刘纪远,张增祥,徐新良,等. 21 世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析[J]. 地理学报, 2009, 64(12): 1411-1420.
- [7] 吴明发,欧名豪,廖荣浩. 经济发达地区土地利用变化及其驱动力分析:以广东省为例[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1): 179-183.
- [8] 张云鹏,孙燕,王小丽,等. 不同尺度下的土地利用变化驱动力研究:以常州市新北区为例[J]. 水土保持研究, 2012, 19(6): 111-116.
- [9] 谢花林. 典型农牧交错区土地利用变化驱动力分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 56-62.
- [10] 郇红艳,谭清美,朱平. 城乡一体化进程中耕地利用变化的驱动因素及区域比较[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 201-205.
- [11] 高啸峰,王树德,宫阿都,等. 基于主成分分析法的土地利用/覆被变化驱动力研究[J]. 地理与地理信息科学, 2009, 25(1): 36-39.
- [12] 庄大方,刘纪远. 中国土地利用程度的区域分异模型研究[J]. 自然资源学报, 1997, 12(2): 105-111.
- [13] 谢正峰,王倩. 广州市土地利用程度的空间自相关分析[J]. 热带地理, 2009, 29(2): 129-133.
- [14] 宋宏利,张晓楠,张文义,等. 基于 RS 的区域土地利用空间结构特征分析[J]. 中国农学通报, 2012, 28(5): 200-206.
- [15] 赵哲远,马奇,华元春. 浙江省 1996—2005 年土地利用变化分析[J]. 中国土地科学, 2009, 23(11): 23-27.
- [16] 张舟,吴次芳,谭荣. 生态系统服务价值在土地利用变化研究中的应用:瓶颈和展望[J]. 应用生态学报, 2013, 24(2): 556-562.
- [17] 谢菲,舒晓波,廖富强,等. 浮梁县土地利用变化及驱动力分析[J]. 水土保持研究, 2011, 18(2): 213-217.
- [18] 汪小兰,蒋先军,曹良元,等. 季节变化对不同形态氮素在土壤团聚体中分布的影响[J]. 西南大学学报:自然科学版, 2013, 35(3): 133-133.
- [19] 王燕高,胡庭兴. 我国引种巨桉及其研究进展[J]. 森林工程, 2005, 21(4): 1-4.
- [20] 石薇,龚伟,胡庭兴,等. 然林及坡耕地转变为巨桉林后土壤抗蚀性变化[J]. 四川林业科技, 2011, 32(3): 18-22.
- [21] Zhang D, Zhang J, Yang W, et al. Effects of afforestation with *Eucalyptus grandis* on soil physicochemical and microbiological properties [J]. *Soil Research*, 2012, 50(2): 167-176.
- [22] 刘合明,杨志新,刘树庆. 不同粒径土壤活性有机碳测定方法的探讨[J]. 生态环境, 2008, 17(5): 2046-2049.
- [23] 张保华. 长江上游典型区域森林土壤结构体形成和稳定性机制分析[J]. 聊城大学学报:自然科学版, 2007, 20(1): 12-17.
- [24] 石辉. 转移矩阵法评价土壤团聚体的稳定性[J]. 水土保持通报, 2006, 26(3): 91-95.
- [25] 李阳兵,谢德体. 不同土地利用方式对岩溶山地土壤团粒结构的影响[J]. 水土保持学报, 2001, 15(4): 122-125.
- [26] 谢贤健,张继. 巨桉人工林下土壤团聚体稳定性及分形特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6): 175-179.
- [27] 山仑,徐炳成. 黄土高原半干旱地区建设稳定人工草地的探讨[J]. 草业学报, 2009, 18(2): 1-2.
- [28] 刘敏英,郑子成,李廷轩. 不同植茶年限土壤团聚体的分布特征及稳定性研究[J]. 茶叶科学, 2012, 32(5): 402-410.
- [29] 李阳兵,魏朝富,谢德体,等. 岩溶山区植被破坏前后土壤团聚体分形特征研究[J]. 土壤通报, 2006, 37(1): 51-55.
- [30] 徐柳斌,陆梅,向仕敏. 滇西山地桉树林土壤物理性质研究[J]. 山东林业科技, 2007(6): 41-43.
- [31] 石箭华,孟广涛,李品荣,等. 滇中不同植物群落土壤团聚体组成及养分特征[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 183-187.
- [32] 张丹桔,张健,杨万勤,等. 一个年龄序列巨桉人工林植物和土壤生物多样性[J]. 生态学报, 2013, 33(13): 3947-3962.

(上接第 92 页)