

## 林木根系的加筋作用试验研究

宋维峰<sup>1</sup>, 陈丽华<sup>2</sup>, 刘秀萍<sup>2</sup>

(1. 西南林学院 环境科学与工程系, 昆明 650224; 2. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

**摘 要:**为探索林木根系的固土机理, 基于加筋理论, 采用三轴压缩试验的方法, 对黄土加根土与素黄土在相同的土壤含水量和密度条件下, 进行了 25, 50, 75, 100 kPa 下的压缩试验, 得出了加根黄土与素黄土的应力应变关系和应力差强度包线图, 对加根土与未加根土的应力圆进行了分析, 推导了加根土的“似黏聚力”。试验表明: 在不同围压下, 应变达到一定程度, 含根土总是比素黄土的主应力差大一个值, 说明在根系分布的不同深度, 根系都增强了土体的强度。

**关键词:** 林木; 根系; 加筋; 水土保持

**中图分类号:** S157.43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2008)02-0099-04

## Experiment on Forest Roots Reinforcement Mechanism

SONG Wei-feng<sup>1</sup>, CHEN Li-hua<sup>2</sup>, LIU Xiu-ping<sup>2</sup>

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Southwest Forestry College, Kunming 650224, China; 2. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** With reinforcement theory, an experiment of different confining pressures on root-soil composite and plain soil roots under the same conditions of soil water content and density was carried out by using triaxial test. Four confining pressures of 25, 50, 75 and 100 kPa were tested. Based on the experiment results, a relationship of stress and strain between root-soil composite and plain soil as well as stress difference Mohr's envelope is established. Further, pseudo cohesion of root-soil composite is deduced after analysis of stress difference Mohr's envelope of root-soil composite and plain soil. The experiment shows the result that root-soil composite always have greater principal stress than plain soil by a value of when strain reaching a certain extent under various confining pressures, which means roots at various soil depth can increase shear strength of soils.

**Key words:** forest; roots; reinforcement; soil and water conservation

林木根系可以有效地提高土的强度和稳定性, 这个道理很早就被人们所认识, 也被前大量的试验所证实, 而且根系的固土作用也已被广泛用于生产和工程实践中。虽然半个多世纪的根系研究在不同侧面对根系的固土作用进行了大量的研究和探索<sup>[1-19]</sup>, 取得了一定的成果, 但是对根系提高土的强度和稳定性的机理还不太清楚, 对其机理的认识还没有上升到理论高度。在工程领域, 1965 年法国工程师维达尔(Henri Vidal)提出了加筋土的设计理论, 并成功地修建了第一座现代化的加筋土挡墙。其后, 国内外的许多科学家对加筋土的机理做了大量的试验和研究, 使加筋土技术上升到一定的理论高度。

所谓加筋土<sup>[20]</sup>就是由一层或多层水平加筋构件与填土交替铺设而成的一种复合体, 其强度显著高与素土。受加筋理论的启发, 我们认为, 林木根系是天然的加筋材料, 根土组成的复合体是天然的加筋土, 只是林木根系的分布要比工程中的加筋材料的分布复杂的多。林木根系可分为垂直根和侧根, 垂直根主要起锚固作用, 而侧根主要起加筋的作用。所以加筋土的作用机理与林木根系侧根的固土机理有相似

之处, 值得借鉴。

### 1 加筋理论的基本内容

目前, 有 2 种观点揭示加筋土的力学特性变化机理, 它们是摩擦加筋原理, 准黏聚力原理。

(1) 摩擦加筋原理<sup>[20-21]</sup>。加筋体是土体中的受拉构件, 土与加筋体间的摩阻作用既可将加筋体的拉力传递到土中, 又可阻止土层的侧向变形发展。即当土层相对加筋体运动时, 接触面的摩阻力阻止这种运动; 当加筋体受拉力作用时, 接触面上的摩阻力又阻止加筋体拔出。因此, 只要加筋体具有足够的强度, 并与土产生足够的摩阻力, 则加筋土就可保持稳定。

(2) 准黏聚力原理<sup>[20-21]</sup>。加筋体与土体的共同作用包括土体本身的抗剪力、加筋体与加筋体的摩阻力及加筋体的抗拉力, 它们使得加筋土的强度明显提高。在侧限应力给定的条件下, 破坏时加筋土单元的轴向应力大于素土单元的轴向应力。实际上是等效材料原理<sup>[22-23]</sup>。

收稿日期: 2007-09-04

基金项目: 国家重大基础研究“973”项目(2002CB111502); 国家自然科学基金项目(30571531)

作者简介: 宋维峰(1967—), 男, 副教授, 博士, 主要从事生态环境工程, 森林水文研究。E-mail: songwf85@126.com

## 2 根系加筋试验

为了验证加筋理论在根系固土实践中的适用性和根系提高土体抗剪强度的效果,采用三轴压缩试验进行加根土与素黄土强度试验,加根方式为水平加根,加根量为 0.55%,得到加根土与素土的应力与应变关系和应力差强度包线。

### 2.1 试验设备

采用北京华勤科技有限责任公司生产的 KTG 全自动三轴压缩仪。试验过程控制和数据采集全由计算机完成。

### 2.2 试验材料

#### 2.2.1 试验土样

试验所用土取自甘肃省天水市吕二沟油松林下,属于典型的陇西  $Q_3$  黄土,取土深度表层 100 cm 深处,土呈褐黄色,天然含水量 6.2%~9.7%,天然密度 1.35~1.58 g/cm<sup>3</sup>。对试验用黄土进行了物理性质试验后,其物理性质见表 1,土样的颗粒组成见表 2。

表 1 试验用土的物理性质指标

液限 $W_L/\%$	塑限 $W_P/\%$	塑性指数 $I_P$
25.45	13.6	11.85

表 2 试验用土的颗粒组成

							%
20~5	5~2	2~0.5	0.5~	0.25~	0.1~	0.05~	<0.00
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	5mm
0.18	0.12	0.53	1.98	8.89	32.8	44.8	10.7

#### 2.2.2 试验根系

试验所用根系取自北京市延庆县,为油松根系,试验用根系的直径为 3 mm。

#### 2.2.3 试样制备

三轴试样尺寸(直径  $D \times$  高  $H$ )(mm)为 39.1 mm  $\times$  80 mm,试样截面积 12 cm<sup>2</sup>。根据实验设计的土壤含水量和干密度,按照规范<sup>[24]</sup>(GB/T50123-1999)制备试样。

(1)扰动土试样的备样。①将土样从土样筒或包装袋中取出,对试样的颜色、气味、夹杂物和土类及均匀程度进行描述,并将土样切成碎块,拌和均匀,取代表性土样测定含水量。②采用天然含水量状态代表性土样,供颗粒分析、界限含水量试验。③将风干土或烘干的土样放在橡皮板上用木碾碾散。

(2)扰动素土试样(A)的制样。①将碾散的风干土样通过孔径 2 mm 的筛,取筛下足够试验用的土样,充分拌匀,测定风干含水量,装入保湿缸或塑料袋内备用。②根据试验所需的土样与含水量,制备试样所需的加水量。按式(1)计算

$$m_w = \frac{m_0}{1 + 0.01w_0} \times 0.01(w_1 - w_0) \quad (1)$$

式中: $m_w$ ——制备试样所需要的加水量(g); $m_0$ ——湿土(或风干土)质量(g); $w_0$ ——湿土(或风干土)含水量(%); $w_1$ ——制样要求的含水量(%)。

③称取过筛的风干土样平铺于搪瓷盘内,将水均匀喷洒内,成分拌匀后装入盛土容器内盖紧,润湿一昼夜。④测定

润湿土样不同位置处的含水率,不少于两点,含水率差值应符合国家标准。⑤在击样器内分 4 层击实,各层土料数量应相等,各层接触面应打毛。击实最后一层,将土样器内的试样两端整平,取出试样称量。

以上试验方法详见 GB/T50123-1999。

(3)加根土试样的制备。在土样两头 2 cm 处各加 1 长度为 3.5 cm 的水平根,加根直径和长度是根据试验设计的含根量来确定的。

### 2.3 试验方法

采用应变控制式,加载速率采用每分钟应变 0.012%,剪切到峰值后达 15%轴向应变。

试验方法详见 GB/T50123-1999。

### 2.4 试验设计

试验采用不固结不排水(UU)试验。

根据试验区域的土壤天然含水量和土壤密度,不固结不排水(UU)试验设计土壤含水量为 15.0%,土壤干密度为 1.36 g/cm<sup>3</sup>,采用一样多级剪切。围压  $\sigma_3$  的确定原则是最大  $\sigma_3$  的值应略大于土体实际承受的最大有效应力。最小的  $\sigma_3$  值应不小于土层覆盖层的压力<sup>[24]</sup>。按照这一原则确定 4 个围压值分别为 25,50,75,100 kPa。

## 3 结果分析

### 3.1 不同围压下素黄土与含根土的应力应变关系对比

图 1 是围压分别为 25,50,75,100 kPa 时素黄土与含根土的应力应变关系比较,加根土圆柱土样与未加根的圆柱土样三轴对比试验发现,素土在  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  的共同作用下达到极限平衡,而加根土在同样大小的  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  作用下却达不到极限平衡状态,仍然处于弹性平衡状态。

在试验中对加根土仍施加  $\sigma_3$  并保持不变,欲使试样达到新极限平衡状态,必须将  $\sigma_1$  增大至  $\sigma_{1f}$ 。根据摩尔-库仑破坏准则,试样处于新极限平衡状态下的表达式如式(2)

$$\sigma_{1f} = \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}) + 2c \cdot \tan(45^\circ + \frac{\phi}{2}) \quad (2)$$

式中: $\sigma_{1f}$ ——加根土样破坏时的最大主应力; $\sigma_3$ ——作用于土样侧面的最小主应力; $\phi$ ——未加根土的内摩擦角; $c$ ——加根土样的“似黏聚力”。

根土复合体具有准黏聚力,说明根土复合体仍符合 Mohr-库仑水平根 Coulomb 抗剪强度理论。

### 3.2 加根土应力状态分析

加根土可以看作是各向异性的复合材料,树木根系的弹性模量远大于土体。在这种情况下,根系与土的共同作用,包括土的抗剪力、土与根系的摩擦阻力及根系的抗拉力,使带有根系的土体的强度明显提高。

加根土的基本应力状态如图 2 所示。在没有根系的土体中,在竖向应力  $\sigma_1$  的作用下,土体产生竖向压缩变形。随着竖向应力的加大,压缩变形和侧向变形也随之加大,直到破坏。如果在土体中设置了水平方向的根系,则在同样的竖向应力  $\sigma_1$  作用下,其侧向变形则会大大减小,如图 2b)所示。

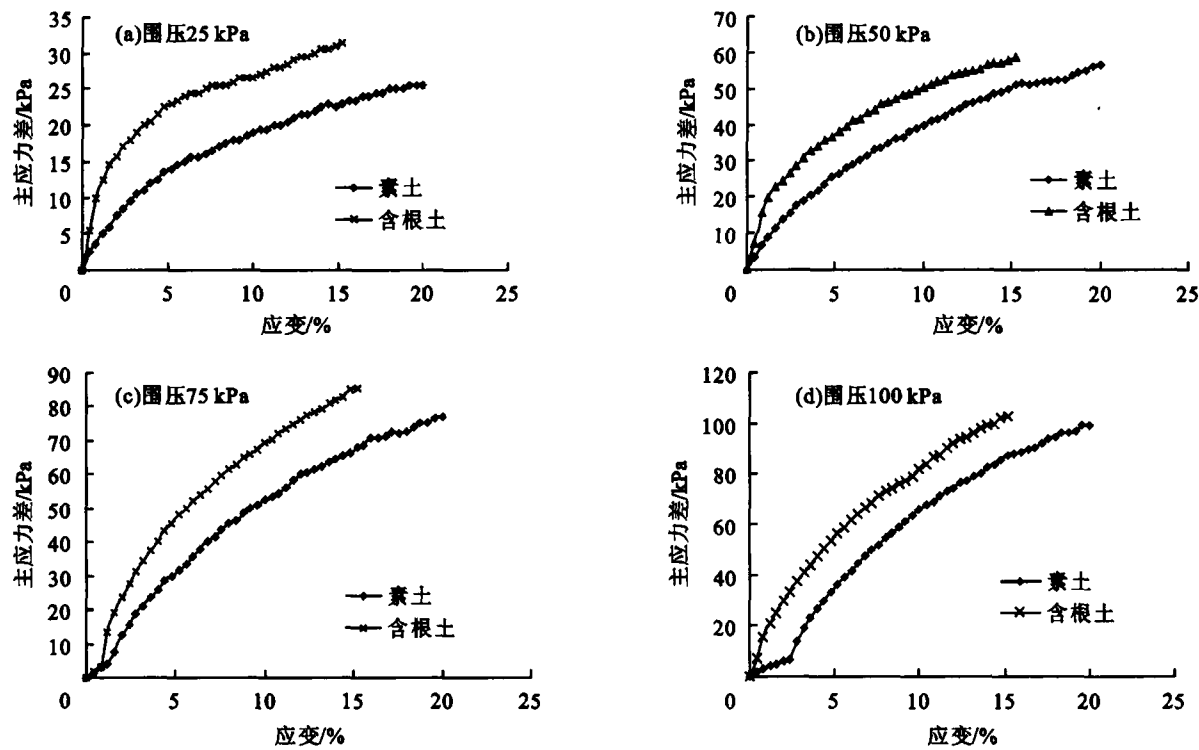


图 1 不同围压下素黄土与含根土的应力应变关系对比

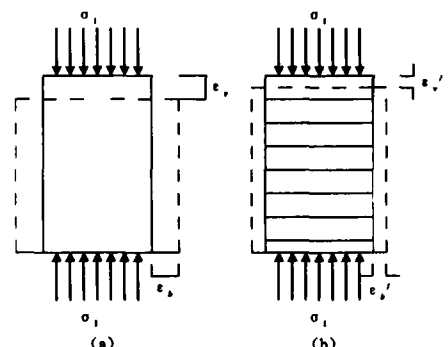


图 2 加根土的基本应力状态

3.3 不同围压下素黄土与含根土应力差强度包线对比

分别对素黄土和加根土样在 25, 50, 75 和 100 kPa 不同围压的作用下进行三轴压缩试验, 得到加根土与素土的三轴应力差强度包线(图 3、图 4), 从图中可以看出, 2 个试验的内摩擦角  $\varphi$  值分别为  $32.3^{\circ}$  和  $29.1^{\circ}$ , 非常接近, 强度线基本平行, 而加根土的粘聚力  $c$  值为 4, 素土的  $c$  值为 1, 存在一个  $\Delta c$  为 3。这说明加根土圆柱土样与未加根的圆柱土样的内摩擦角保持在接近的水平, 只是未加根土在  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  的共同作用下达到极限平衡时, 加根土在同样大小的  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  作用下却达不到极限平衡状态, 仍然处于弹性平衡状态, 要使

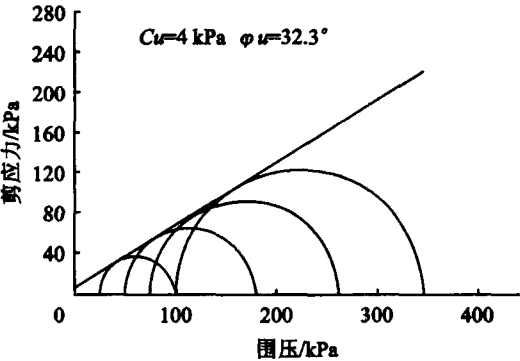


图 3 加根土三轴应力差强度包线图

其达到极限平衡状态, 需要进一步增大  $\sigma_1$ 。这说明加根土的强度提高了。

这是由于水平根系与土体之间产生了摩擦作用, 将引起侧向膨胀的拉力传递给根系, 使土体侧向变形受到约束。根系的约束力  $\sigma_R$  相当于在土体侧向施加了一个侧压力  $\Delta\sigma_3$ , 其关系可用莫尔圆表示, 如图 5a) 所示。莫尔圆 I 为土体未破坏时的弹性应力状态; 圆 II 则是未加根的土体极限应力状

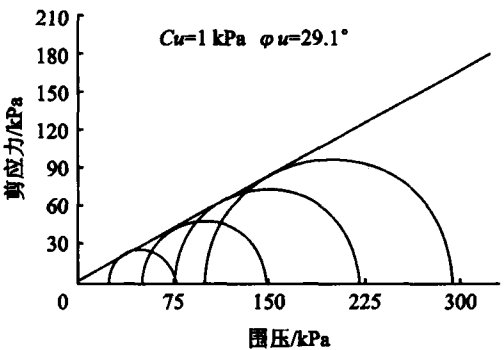


图 4 素土三轴应力差强度包线图

态; 圆 III 是加根土体的应力状态, 土体中加入高模量的根系后, 根系对土体提供了一个约束力  $\sigma_R$ , 即水平应力增量  $\Delta\sigma_3 = \sigma_R$ , 使得侧向压力减小, 亦即在相同的轴向变形条件下, 加根土能承受较大的主应力差。这还可以通过常规三轴试验中的应力变化情况来表示, 如图 3b) 所示, 图中圆 IV 为无根土极限状态时的莫尔圆, 圆 VI 为加根土的莫尔圆, 圆 VI 的  $\sigma_3$  与圆 IV 的相等, 而能承受的压力则增加了  $\Delta\sigma_R$ , 圆 V 为加根

土中填土的极限莫尔圆,其最大主应力  $\sigma_1$ ,与圆 VI 的相等,而最小主应力却减少了  $\Delta\sigma_3$ ,上述分析说明,加根土体的强度

有了增加,应有一条新的抗剪强度线来反映这种关系,如图 5c) 所示。

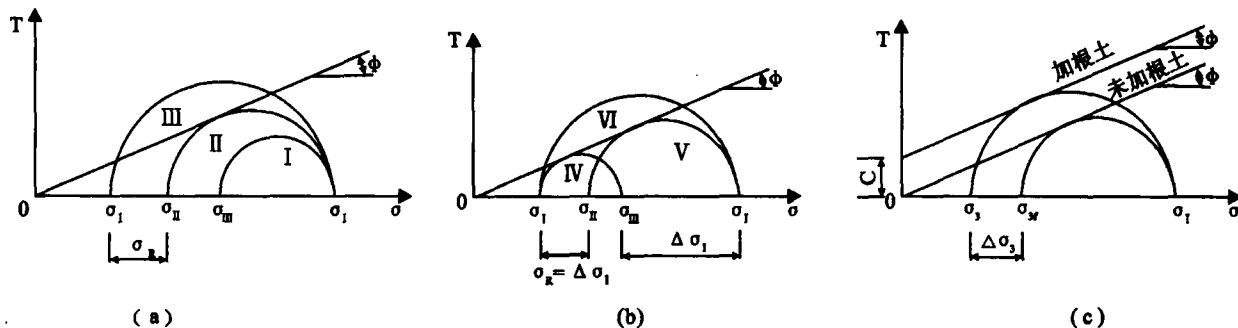


图 5 加根土与未加根土的应力圆分析

### 3.4 加根土样的“似黏聚力”推导

将式(2)和未加根土样的极限平衡条件相比,加根土中多了一项由  $c$  所引起的承载力,这是由于加根土力学性质的改变是由于新的复合土体(即根土复合体)具有某种“黏聚力”的缘故,这种黏聚力不是原来的土所具有的,而是加根的结果。由于根与土之间的相互作用,相应地对原来的土体产生一种侧向的约束,就像钢筋混凝土中的箍筋一样,限制了土体的侧向变形,就相当于在原来土体小单元中提供了一个侧压力增量  $\Delta\sigma_3$ ,提高了土体的抗压强度,这种侧压力增量在式(1)中用“黏聚力  $c$ ”来代替了。因此,我们称这个“黏聚力”为“似黏聚力”,它反映了加根土复合结构的材料特性。

将加根土看作是未加根土,欲使其达到极限平衡状态有

$$\sigma_{1f} = (\sigma_3 + \Delta\sigma_3) \operatorname{tg}^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}) \quad (3)$$

式(3)又可以写作

$$\sigma_{1f} = \sigma_3 \operatorname{tg}^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}) + \Delta\sigma_3 \operatorname{tg}^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}) \quad (4)$$

式中:  $\Delta\sigma_3$ ——因加根而产生的侧向应力增量。

比较式(2-4)和式(2-6)可得

$$2c \cdot \operatorname{tg}^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}) = \Delta\sigma_3 \operatorname{tg}^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}) \quad (5)$$

$$c = \frac{\Delta\sigma_3 \sqrt{k_p}}{2} \quad (6)$$

式中:  $k_p$ ——被动土压力系数。

$$k_p = \operatorname{tg}^2(45^\circ + \frac{\phi}{2}) \quad (7)$$

式(3)中的等效应力增量  $\Delta\sigma_3$  由于是加根土中的拉根产生的,无法直接测量,可按式(8)计算

$$\Delta\sigma_3 = \sigma_3 \left( \frac{\sigma_{1f}}{\sigma_1} \right) \quad (8)$$

式中:  $\sigma_1$ ——未加根土试样破坏时的最大主应力;  $\Delta\sigma_1 f$ ——加根土试样破坏时的最大主应力增量。  $\Delta\sigma_1 f = \sigma_{1f} - \sigma_1$

由式(5)和式(7)可得似黏聚力

$$c = \frac{\sigma_3 \frac{\sigma_{1f}}{\sigma_1} \sqrt{k_p}}{2} \quad (9)$$

## 4 结 语

将现代土工加筋理论引入根系固土的机理研究之中,用现今关于加筋土比较公认的基本原理来解释和分析林木根

系的固土机理,并用三轴试验对准黏聚力原理进行了试验验证。试验表明:土工加筋理论适合林木根系加筋作用的分析 and 评价,由于根系形态分布为三维状态,十分复杂,所以土工加筋理论具有局限性,需要进一步的深化研究,以便使其理论更具宽度和广度。

### 参考文献:

- [1] Lee I W Y. A review of vegetative slope stabilization [J]. Hong Kong Engineer, 1985, 13: 9-21.
- [2] Gray D H. Effects of forest clear-cutting on the stability of natural slopes [J]. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 1970, 7: 45-66.
- [3] Gray D H, Leiser A T. Biotechnical slope protection and erosion control [M]. New York: Van Nostrand Reinhold Co., 1982: 271.
- [4] Gray D H, Megahan W F. Forest vegetation removal and slope stability in the Idaho Batholith [J]. Forest Service, 1981: 23.
- [5] Gray D H, Sotir B R. Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization; a practical guide for erosion control [M]. John Wiley & Sons, Toronto, 1996.
- [6] Bishop D M, Stevens M E. Landslides on logged areas in southeast Alaska [J]. Northern Forest Experiment Station, 1964: 18.
- [7] Waldron L J. The shear resistance of root-permeated homogenous and stratified soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 1977, 41: 843-849.
- [8] Waldron L J, Dakessian S. Soil reinforcement by roots: calculation of increased soil shear resistance from root propensities [J]. Soil Science, 1981, 132: 427-435.
- [9] Waldron L J, Dakessian S. Effect of grass, legume, and tree roots and soil shearing resistance [J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46: 894-899.
- [10] Waldron L J. The shear resistance of root-permeated homogenous and stratified soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 1977, 41: 843-849.

(下转第 106 页)

出明显的负相关关系。多样性指数的变化说明景观整体结构逐步向多样化和均衡化的方向发展。优势度指数的减小说明了鄱阳湖区景观是由多种类型的斑块所共同组成的,没有出现或形成占主导地位的土地利用类型。其主要原因是由于退田还湖政策实施以后,为保证湖区经济的繁荣和可持续发展,采取了调整和优化湖区农业产业结构、农业资源的高效利用等一系列的措施,同时随着鄱阳湖区经济的发展和人口的增加,使得研究初期所占比例较小的水域与建设用地比重增加,而初期比重较大的耕地比重减少,各种景观类型的比例差异减小,从而改变了鄱阳湖区整体景观的多样性和优势度。

#### 4 结 论

(1)在1985—1995年,1995—2000年和2000—2005年这3个时间段内,鄱阳湖区土地利用变化的特征是:耕地面积先增加后减少再增加,而水域面积的变化则恰好相反;建设用地面积持续增加;而其他土地利用类型虽有所波动,但变化幅度不大。

(2)从土地利用转化的角度看,各个时期内鄱阳湖区的土地利用类型转变各有差异,但从整体上来看,耕地与水域之间实现转换,而建设用地的增加主要来自于耕地。同时,鄱阳湖区的土地利用变化在空间上存在着很大的差异性,这主要由经济因素所引起的。

(3)从景观格局的变化看,鄱阳湖区景观的破碎度指数为先减少后增加的趋势,说明鄱阳湖区土地利用在受到人类干扰下出现相对规则化后,其景观正趋向于破碎化;多样性指数的变化趋势表明景观整体结构的复杂性在增加,逐步朝着多样化和均衡化的方向发展;优势度的变化趋势揭示了土地利用格局是由多种类型的土地斑块所组成,没有出现占主

导地位的土地利用类型,各种景观类型的比例正趋于合理化。鄱阳湖区景观格局的演变是与退田还湖政策的实施、湖区经济的发展以及人口的增加和农业结构的调整与优化密不可分。

#### 参考文献:

- [1] IGBP & HDP. Land-use and Land-cover Change: Science/research plan [J]. IGBP Report35; HDP. report, 1995:113-140.
  - [2] 程峰. 土地利用与土地覆盖变化研究综述[J]. 国土资源情报, 2003 (1): 51-56.
  - [3] 韦素琼, 陈建飞. 土地利用变化区域对比研究: 以闽台为例[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
  - [4] 肖笃宁, 布仁仓, 李秀珍. 生态空间理论与景观异质性[J]. 生态学报, 1997, 17(5): 453-461.
  - [5] 赵景柱. 景观生态空间格局动态度量指标体系[J]. 生态学报, 1990, 10(2): 182-186.
  - [6] 王仰麟, 赵一斌, 韩荡. 景观生态系统的空间结构: 概念、指标与案例[J]. 地球科学进展, 1999, 14(3): 235-241.
  - [7] 王宪礼, 肖笃宁, 布仁仓等. 辽河三角洲湿地的景观格局分析[J]. 生态学报, 1997, 17(3): 317-323.
  - [8] 周铁军, 赵廷宁, 孙保平, 等. 宁夏盐池县土地利用与景观格局变化研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(1): 135-138.
  - [9] 汤崇军. 退田还湖地区土地利用结构动态变化研究: 以鄱阳湖区为例[D]. 南昌: 江西师范大学, 2006.
  - [10] 莫宏伟, 任志远, 谢红霞. 东南丘陵土地利用变化及驱动力研究: 以衡阳市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2004, 13(6): 551-556.
- 
- (上接第102页)
- [11] Wu T H, Beal P E, Lan C. In-situ shear test of soil-root systems[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 114: 1376-1394.
  - [12] Wu T H, McKinnell III W P, Swanston D N. Strength of tree roots and landslides on prince of wales Island, Alaska[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1979, 16: 19-33.
  - [13] 解明曙. 林木根系固坡力学机制研究[J]. 水土保持学报, 1990, 4(3): 7-14.
  - [14] 周跃, 张军, 林锦屏, 等. 西南地区松属侧根的强度特征对其防护林固土护坡作用的影响. [J]. 生态学杂志, 2002, 21(6): 1-4.
  - [15] 周跃, 陈晓平, 李玉辉, 等. 云南松侧根对浅层土体的水平牵引效应的初步研究[J]. 植物生态学报, 1999, 23(5): 458-465.
  - [16] 周跃, 李宏伟, 徐强. 云南松幼树垂直根的土壤增强作用[J]. 水土保持学报, 2000, 14(5): 110-113.
  - [17] 朱清科, 陈丽华, 张东升, 等. 贡嘎山森林生态系统根系固土力学机制研究[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(4): 64-67.
  - [18] 封金财, 王建华. 植物根的存在对边坡稳定性的作用[J]. 华东交通大学学报, 2003, 20(5): 42-45.
  - [19] 杨维西, 赵廷宁, 李生智, 等. 人工刺槐林采伐后根系固土作用的衰退状况[J]. 水土保持学报, 1990, 4(1): 6-10.
  - [20] 欧阳仲春. 现代土工加筋技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 1991.
  - [21] 杨果林, 王永和. 加筋土筋材拉拔试验研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(1): 51-54.
  - [22] 吴景海, 王德群, 陈环. 土工合成材料加筋砂土三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 199-204.
  - [23] 白晓红, 黄仙枝, 张苇. 加筋土技术在土木工程中的应用[J]. 太原理工大学学报, 2003, 34(5): 532-534.
  - [24] 土工试验方法标准(GB/T50123-1999)[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
  - [25] 朱思哲, 刘虔, 包承纲, 等. 三轴试验原理与应用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003: 6-86.