

基于三维激光扫描成像系统的树木干曲线的分形特征

罗旭^{1,2}, 程承旗¹, 冯仲科³, 陈晓雪³

(1. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 中国计量科学研究院, 北京 100013;
3. 北京林业大学 资源与环境学院, 北京 100083)

摘要: 树木干曲线具有分形的结构, 文章应用分形方法对甘肃小陇山地区 86 棵不同树种的单木以及解析木干曲线进行研究, 通过计算得到干曲线的分形维数介于 2~3 之间, 研究结果表明同一树种树木干曲线的生长趋势是一致的。经过对单木干曲线和标准解析木干曲线分形维数的测定以及比较分析, 可以发现同一树种不同径阶的树木干曲线具有统计意义上的自仿射分形特征, 表明分形方法在对树木及其组成部分的形态上的描述作用极大。文章针对立木的测量, 采用三维激光扫描成像系统, 不仅获得了丰富的测树因子信息, 更以此为基础对森林计测学研究进行了扩展。

关键词: 分形; 干曲线; 解析木; 三维激光扫描成像系统

中图分类号: S758.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2007)05-0401-05

Fractal Characteristic of Stem Curve Based on the 3-D Laser Scanning Imaging System

LUO Xu^{1,2}, CHENG Cheng-qi¹, FENG Zhong-ke³, CHEN Xiao-xue³

(1. School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China;

2. China National Institute of Metrology, Beijing 100013, China;

3. College of Resources and Environment, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The stem curve of trees has fractal configuration, the main work of this text is study the stem curve of signal tree and parse tree of 86 different kinds on Xiaolongshan in Gansu province with methods of fractal. From the calculation we can see that the fractal dimension of stem curve is between 2 and 3, which show that the vegetal trend of stem curve of the same kind is coincident. According to the determining and comparative analyse of stem curve between simple trees and standard parse trees, we can see that the stem curve of same kind but different diameters is provided with self-affine characteristic in the statistical meanings, and indicate that fractal methods play an important role in describing the configuration of trees and the compositive parts. This research aims at the surveying of stumpage by 3-D laser scanning imaging system which is not only obtain abundant information of surveying tree gene, but also expend the research of forest calculating and surveying which is a very significative work.

Key words: fractal; stem curve; parse tree; 3-D laser scanning imaging system

近几十年来, 分形理论在林业当中的应用已经非常广泛。例如具有在树木动态过程分析、木材科学及工艺、冠层结构特征描述、林业遥感图像中的纹理分析、植物形态模拟、树木特征数据库的建立等多方面的应用。

为了研究树木干曲线的动态生长过程, 文章汲取大量的理论经验, 应用分形理论对甘肃省小陇山地区的各种树木的干曲线进行研究分析, 并对单木干曲线以及解析木干曲线的分形维数进行计算和比较, 来分析树木干曲线的分形特征, 为研究树木的动态生长过程进行有益的探索。

1 分形理论概述

英文单词 fractal 被译为“分形”, 它是由美籍法国数学

家曼得勃罗 (Benoit Mandelbrot) 创造出来的。此词源于拉丁文形容词 fractus, 对应的拉丁文动词是 frangere (破碎, 产生无规碎片)。曼得勃罗是想用此词来描述自然界中传统欧几里得 (以下简称欧式) 几何学所不能描述的一大类复杂无规的几何对象。例如, 蜿蜒曲折的海岸线、起伏不定的山脉、粗糙不堪的断面、变幻无常的浮云、九曲回肠的河流、纵横交错的血管、令人眼花缭乱的满天繁星等, 它们的特点是极不规则或极不光滑, 直观而粗略地说, 这些对象都是分形。

英国数学家 Falconer 在其所著《分形几何的数学基础及应用》一书中认为分形应看作具有如下所列性质的集合 F:

(1) F 具有精细结构, 即在任意小的比例尺度内包含整体。

收稿日期: 2006-03-28

基金项目: 国家“863”计划基金项目 (2006AA706209-2); 国家自然科学基金项目 (90302014)

作者简介: 罗旭 (1967-), 男, 博士后, 主要从事生态环境、工程及灾变环境 3S 监测与预报、测绘空间技术研究。

(2)F 是不规则的,以致于不能用传统的几何语言来描述。

(3)F 通常具有某种自相似性,或许是近似的或许是统计意义上的。

(4)F 在某种方式下定义的“分维数”通常大于 F 的拓扑维数。

(5)F 的定义常常是非常简单的,或许是递归的^[1]。

2 样地概况以及研究工具

甘肃小陇山自然保护区位于秦岭山脉西段及嘉陵江上游,在甘肃省小陇山林业实验局境内,东与陕西省凤县、勉县为界,南邻陕西省略阳县,西、北为嘉陵江,位于东经 106°13'10"~106°33'06",北纬 33°35'12"~33°45'11"之间,面积 3 193.8 hm²,主要保护我国暖温带—亚热带过渡地区原始森林生态系统。

三维激光扫描成像系统是通过高速激光扫描测量的方法,以被测对象的采样点(离散点)集合—称之为“点云”的形式获取物体或地形表面的阵列式几何图像数据,可以快速、大量采集空间点位信息,为快速建立物体的三维影像模型提供了一种全新的技术手段。目前,地面三维激光扫描成像系统的应用,为人们获取丰富的空间信息提供了一种全新的技术手段,测绘人员从传统的单点采集数据变为连续自动获取数据,从而提高了测量的效率,拓宽了测绘技术应用领域。

文章使用三维激光扫描成像系统对小陇山地区的锐齿栎、栓皮栎和华山松等不同年龄、不同径阶以及不同树种的 86 株样本树木进行扫描,对每棵树的胸径、树高、枝下高、冠幅以及在不同树高处的直径大小进行测定。

3 树木干曲线分形特征及分形维数的计算

3.1 树木干曲线的特点

在干形规则的树干上,把横断面看作正圆,这时,通过干

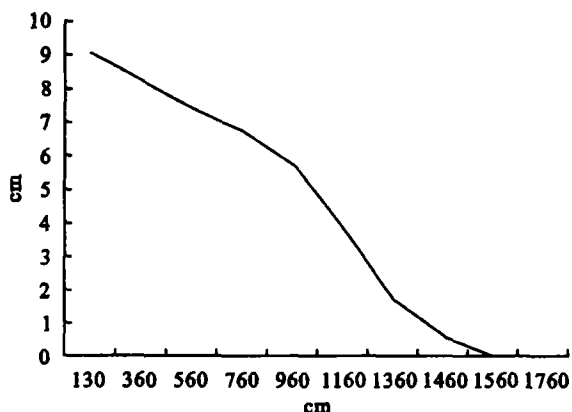


图 2 边长为 ϵ 的被测图

以半径为横坐标,树高为纵坐标绘制出干曲线的坐标图,其具体算法如下:

①在被测图上覆盖边长为的小正方形,统计一下有多少个正方形中含有被测对象,记入中,见图 2。

②缩小正方形,使 $\epsilon = \epsilon/2$,再统计一下有多少个正方形中含有被测对象,记入 N 中,以此类推,见图 3。

③统计不同的 ϵ 值下记入的 N 值,本研究选择 10 个值以提高计算的精度。然后分别以 $\lg N$ 为横坐标,以 $\lg \epsilon$ 为纵

轴的平面与树干表面相交所形成的曲线称干曲线。

干曲线在直角坐标系中,一般以梢顶为原点,以干轴为 X 轴,以直径为 Y 轴。如图 1 所示:

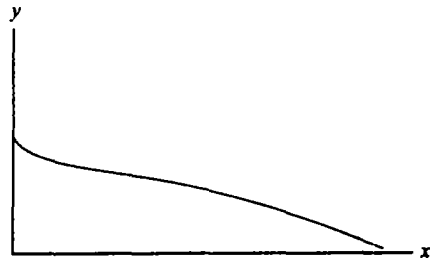


图 1 干曲线

从图 1 中可以看出,干曲线和干轴所包围的平面是树干纵断面的一半,因此说干曲线的形状规定了干形,可以说相对直径序列是间断地表示干长和直径的关系,而干曲线是用连续的曲线表现这种关系的。表示干曲线的方程式称干曲线式,相对干曲线用公式 $y = \varphi(x)$ 表示。

树干形状在测树学中是一个重要的调查因子,它既决定着树干材积的数量和质量,而且还是某些测树用表编制的核心问题。

3.2 干曲线分形维数研究分析

3.2.1 干曲线分形维数的计算方法

将锐齿栎 18 的干曲线绘制在图 2 上,如图可见是一条不光滑的曲线。锐齿栎 18 的树干资料,见表 1:

表 1 锐齿栎 18 的树高及直径数据

树木 编号	树高	断面直径/cm								
		1.3	3.6	5.6	7.6	9.6	11.6	13.6	14.6	15.6
锐 18	15.4	18.1	16.6	14.8	13.5	11.5	7.9	3.5	2.4	0

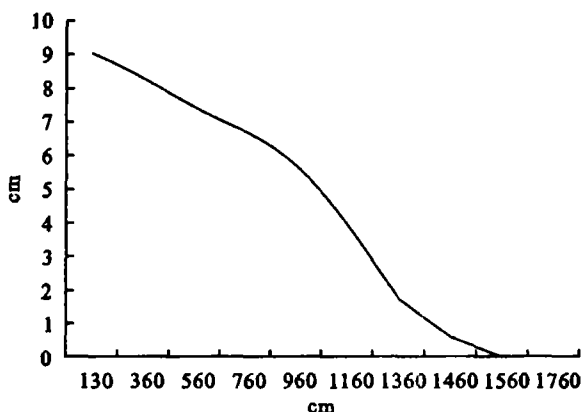


图 3 边长为 $\epsilon/2$ 的被测图

坐标取对数,在双对数坐标系中画出统计曲线,见图 4。

④图 4 显示 $\lg \epsilon - \lg N$ 之间呈比较明显的线性关系,进行直线回归的结果表明,它们都达到了 $P < 0.02$ 的显著性水平,因此,可以得到该干曲线具有分形的特征^[2]。

本例中相关系数 $R = 0.9414$,表明相关关系非常明显,这说明图中近似直线的斜率,可以用来表示我们要求的树干曲线的分形维数。经过由 matlab 程序得到的 31 棵锐齿栎的树干曲线分形维数见表 2。

表 2 31 棵锐齿栎扫描数据的干曲线分形维数

序号	名称	树高/ m	胸径/ cm	分形 维数	相关 系数 R	序号	名称	树高/ m	胸径/ cm	分形 维数	相关 系数 R
1	锐齿栎 29	4.9	4.3	2.8223	0.8745	17	锐齿栎 1824	17.2	24.0	2.7517	0.9473
2	锐齿栎 23	8.4	5.2	2.9113	0.8916	18	锐齿栎 5	18.2	24.7	2.7412	0.9456
3	锐齿栎 24	6.7	7.3	2.8253	0.8820	19	锐齿栎 6	16.4	24.8	2.5586	0.9381
4	锐齿栎 27	8.5	9.9	2.7307	0.8966	20	锐齿栎 17	20.1	27.9	2.7485	0.9469
5	锐齿栎 1814	15.3	13.1	2.5424	0.9393	21	锐齿栎 14	14.2	28.9	2.5922	0.9368
6	锐齿栎 xbl8	16.5	15.8	2.5492	0.9363	22	锐齿栎 15	18.6	28.9	2.6246	0.9494
7	锐齿栎 20	16.0	17.3	2.6813	0.9431	23	锐齿栎 xy18	19.6	29.2	2.5780	0.9468
8	锐齿栎 18	15.4	18.1	2.5441	0.9414	24	锐齿栎 30	19.2	29.6	2.6085	0.9462
9	锐齿栎 13	13.7	18.7	2.5561	0.9451	25	锐齿栎 19	16.4	29.9	2.7553	0.9435
10	锐齿栎 11	16.9	19.8	2.5778	0.9419	26	锐齿栎 22	17.3	33.2	2.6396	0.9486
11	锐齿栎 9	14.1	20.8	2.7445	0.9444	27	锐齿栎 32	18.6	34.1	2.5468	0.9411
12	锐齿栎 16	16.3	21.3	2.7361	0.9490	28	锐齿栎 8	16.6	36.4	2.5736	0.9466
13	锐齿栎 21	11.7	21.4	2.4965	0.9409	29	锐齿栎 25	19.7	38.0	2.5296	0.9414
14	锐齿栎 28	17.4	22.6	2.4024	0.9425	30	锐齿栎 26	16.3	40.9	2.5605	0.9415
15	锐齿栎 10	20.0	22.8	2.5423	0.9458	31	锐齿栎 7	24.0	47.7	2.5989	0.9429
16	锐齿栎 12	18.7	23.9	2.5066	0.9477						

3.2.2 分形维数的方差检验分析

对表 2 中计算出的每棵树的分形维数与对应的树高和胸径分别进行方差分析,结果见表 3:

表 3 干曲线分形维数的方差分析

性状	均方	F 值	显著性水平
胸径	0.00255	0.63	0.6759
树高	0.00130	0.26	0.9296

分析结果如下:方差分析结果显示,树干曲线的分形维数随树高生长和胸径生长差异的显著性水平分别为 0.675 9 和 0.929 6,未达到显著性水平,表明随树高胸径生长的变化差异不显著,说明干曲线的分形维数不随着树高和胸径的生长变化而发生变化,即同种树之间的干形具有一致性,分形维数是描述干曲线动态生长的重要指标之一。

3.2.3 结果与讨论

由表 2 可看出,这 31 棵锐齿栎干曲线分形维数的计算进行的直线回归达到了极显著的相关水平,相关系数均在 0.87 以上,因此这些树木的干曲线都具有分形的特征,分形维数几乎都大于 2.5,因此上述的计算树干曲线的分形维数值是有意义的。

应用同样方法对华山松和栓皮栎的干曲线分形维数进行相同的计算,结果与锐齿栎极为相似(此处加以省略)。因此该地区 86 棵扫描树木干曲线的分形维数几乎均大于 2.5,仅有少数维数小于 2.5,可能是由于树木形状的不规则程度造成的,或者由于干曲线的生长要受到个体自身诸如年龄等条件及生存环境条件和种内种间竞争等多种因素影响,因而会对数据的分析结果带来一定的误差及不确定性^[3~6]。

4 同一树种不同径阶树干直径生长的分形特征

4.1 对解析木干曲线的分形研究

将树干截成若干段,在每个横断面上可以根据年轮的宽度确定各年龄(或阶龄)的直径生长量。在纵断面上,根据断面高度以及相邻两个断面上的年轮数之差可以确定各年龄的树高生长量,从而可进一步算出各龄阶的材积和形数等,

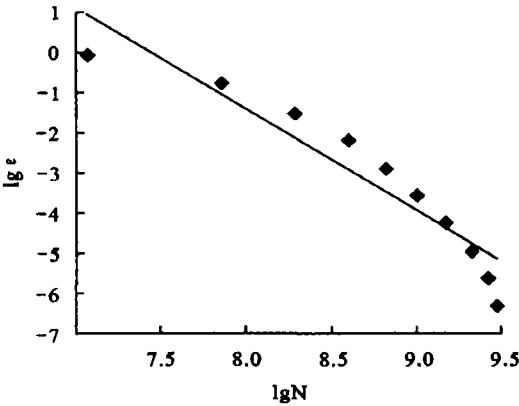


图 4 对干曲线索分形维数的测量

这种分析树木生长过程的方法称为树干解析(stem parse),作为分析对象的树木称为解析木。树干解析是研究树木生长过程的基本方法。

因此由解析木的纵剖面的特征使我们假设其具有自仿射分形的特征,并对其进行干曲线分形维数的计算,用以研究树木生长的动态趋势。把解析木中每年的干形分解开来看作是由一棵棵逐渐增长的小树的集合,见图 5。

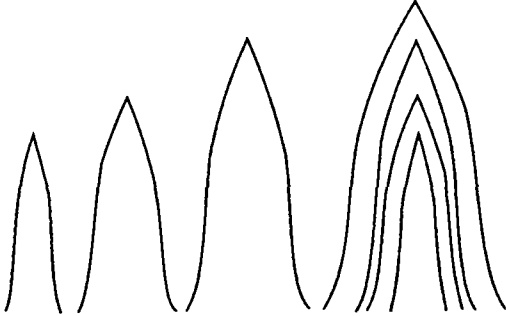


图 5 解析木纵断面和多个单木干曲线比较

4.2 解析木干曲线的分形维数的计算

分别对树龄为 85 a 的锐齿栎、94 a 的华山松和 53 a 栓皮栎三棵解析木进行干曲线的分形维数的计算,与树木干曲线的分形维数的计算方法一致。现以解析木锐齿栎为例,得

到的分形维数值见表 4。

从表 4 中可以看出,从对锐齿栎解析木在树龄为 30~85 a 间的干形曲线所进行的分形维数的计算中可看出分形维数也同样在 2~3 之间,并且相关系数均达到了 0.93 以上,说明线性拟合的结果非常精确。

4.3 分析与讨论

(1)对表 2 和表 4 进行比较可以看出,计算解析木锐齿栎在树龄为 30~85 a 间的干形曲线所得到的分形维数,在 31 棵经由三维激光扫描仪扫描得到的锐齿栎的干曲线分形维数表即表 2 中均可以查到几乎近于相同的数值。并且根据图表显示可看出,相关系数均大于 0.87,说明我们所求得的直线斜率,能够非常准确的表达出树干曲线的分形维数。由于本文研究的是基于三维激光扫描成像系统进行的树木直径及树高的测定,经过对样木干曲线和解析木干曲线分形维数的测定以及比较分析,发现由三维激光扫描仪测到的数据精度非常之高,可以广泛用于今后的森林计测方面的应用中。

表 4 解析木锐齿栎树干曲线分形维数

序号	锐齿栎			
	年轮编号	树高/m	分形维数	相关系数 R
1	30 年	10.2	2.7235	0.9395
2	40 年	11.6	2.7538	0.9428
3	50 年	13.6	2.7072	0.9443
4	60 年	14.4	2.7031	0.9494
5	70 年	15.3	2.6916	0.9473
6	80 年	16.1	2.7442	0.9476
7	85 年	16.6	2.7056	0.9482

(2)因此我们可以假设,在理想条件下,如果一棵解析木足够标准,那么,根据每个年轮对应一年的常识,若对其进行所有年份的树干曲线分形维数的计算,则得出的值将会与整个一片区域内该树种的所有树木的干曲线的分形维数值一一对应。换句话说,可以把这棵解析木看作是由很多棵相同种类的树木的组合,将解析木的纵剖面剖开可把解析木看作是由一层一层的形状相似的树木构成的,每棵大的树干曲线内部包含着一棵小一点的树干曲线,小点的树干曲线再包含更小的树干曲线……,如图 5 所示。统计意义上来说,由标准解析木来表示该地区相同树种的不同径阶的树木的生长趋势,如果该地区树木足够多,那么每棵树可按树高从小到大进行排列,在理想条件下即可看作每棵树的干形都代表了标准解析木的每一年的生长形状。因此可以看出小陇山地区的华山松,锐齿栎以及栓皮栎这 3 种树木的干曲线具有统计意义上的自仿射分形特征,通过对干曲线分形特征的分析,可以定量地揭示包含在数据资料当中的干曲线的空间复杂性及相关信息量。

5 结 论

树干是树木直径和树高生长的体现,树干的形状取决于树木的遗传特性和环境因素,每个树种在其个体成熟时都基本上表现出特定的树干形状,通过对小陇山样区 86 棵经三维激光扫描仪扫描得到的干曲线分形维数值的计算分析,表

明同一树种的干形在遗传特性上是一致的。而由于测得的每棵树干的干形维数值并不尽完全相同,可知是年龄、立地条件和林木间竞争等因素共同作用的结果。这些因素的共同作用会导致同一树种的不同个体树干形状产生较大差异,从而给有关研究工作带来困难。以往对树干形状的研究主要侧重于干曲线方程式的数学模型方面,把干曲线结构看作是一个纯粹的空间几何体进行研究,测量树干的胸径,树高,不同径阶下的直径大小等参数,从而模拟树干曲线的空间几何形状。然而,这些测量工作量大,而且测量过程中的不精确因素较多,造成测量误差较大,因而未能获得理想的模拟效果。因此,把树干结构看作一个生态的同一体而非简单的几何体来研究更为合理。由于干曲线具有分形性质,因此完全可以采用分形维数作为表征树干结构的新参数,这可能是对测树学研究的一种有益的补充。在分形几何出现以前,空间维数很少被作为一个有意义的变量用于森林研究。应用分形几何理论和方法,对用三维激光扫描成像系统扫描的干曲线数据进行分析,并与标准解析木进行对比参照,结果表明分形几何在对树木及其组成部分的形态上描述作用极大。

程序

```
function[b,R]=dim(D,H)
%D,H 为维数相同的列向量
if size(D,1)~=size(H,1)
% error("输入数据有误!");
return;
end
n=0;%每列穿越正方形个数
L=zeros(10,1);
N=zeros(10,1);
%l 为第一个正方形边长
l=(max(D)-min(D))/10;
%从 D 方向检测每列中有几个正方形与直线相交
%计算 10 组值
for j=1:10;
l=((max(D)-min(D))/10)/2*(j-1);
d1=min(D);
d2=d1+l;
while d2<max(D)
%先得到 H 方向上的范围(hd1,hd2)
%hd1 坐在的数据范围
i=1;
while i<size(D,1)
if(d1>=min(D(i),D(i+1))&& d1<max(D(i),D(i+1)))
break;
end
i=i+1;
end
%计算 hd1
hd1=H(i+1)-(D(i+1)-d1)*((H(i+1)-H(i))/(D(i+1)-D(i)));
```

```

%hd2 坐落的数据范围
i=1;
while i<size(D,1)
if (d2>=min(D(i),D(i+1))& d2<max(D(i),D(i+1)))
break;
end
i=i+1;
end
%计算 hd2
hd2=H(i+1)-(D(i+1)-d2)*((H(i+1)-H(i))/(D(i+1)-D(i)));
%hd1-hd2 加上 hd1 距所在方格顶的距离,整除 l 再加 1,
即为所穿过的方格数目
h1=min(H);
%((1-mod((hd1-min(H)),l))+abs(hd1-hd2))-mod
(((1-mod((hd1-min(H)),l))+abs(hd1-hd2))
n=n+round(round((hd1-min(H))/l)*l-(hd1-min
(H))+abs(hd1-hd2));
d1=d1+l;
d2=d1+l;
end
L(j)=l;
N(j)=n;
end
L=log(L);
N=log(N);
%[b,bint,r,rint,stats]=regress(N,L);
[P,S]=polyfit(N,L,1);
LL=N*P(1)+P(2);
sshui=sum((LL-mean(L)).^2);

```

```

sszong=sum((L-mean(L)).^2);
R=sqrt(sshui/sszong);
b=P(1);
x=min(N):(max(N)-min(N))/50:max(N);
y=b*x+P(2);
plot(N,L,'r * ',x,y);

```

参考文献:

- [1] 陈颢. 分形几何学[M]. 北京:地震出版社,2002. 69—78.
- [2] 孙博文. 分形算法与程序设计[M]. 北京:科学出版社,2004. 5—7.
- [3] Zeide B. Fractal analysis of foliage distribution in loblolly pine crowns[J]. Canadian Journal Forest Research,1998,28(1):106—114.
- [4] Cheng ChiChuan. Application of fractal dimension in monitoring forest landscape structure and change[J]. Taiwan Journal of Forest Science,1999,14(4):397—407.
- [5] Palmer M W. A tool for describing spatial patterns of plant communities[J]. Fractal geometry,1990,75:91—102.
- [6] Osawa A. Inverse relationship of crown fractal dimension to self-thinning exponent of tree populations[J]. a hypothesis. Can. J. Forres. ,1991,21:1208—1212.
- [7] Ward C H, Gger W, Mccarty P L. Groundwater quality [M]. John Wiley & Sons. Inc. ,1985,2:164—180.
- [8] Zeide B. Fractal analysis of foliage distribution in loblolly pine crowns [J]. Canadian Journal Forest Research,1998,28(1):106—114.
- [9] 邓向瑞,冯仲科,罗旭. 三维激光扫描系统在林业中的应用研究[J]. 北京林业大学学报,2005,27(增刊2):43.

(上接第 400 页)

又可观海潮,还可观海岸滩涂的海鸟,如海鸥。在这里开辟观海区,宣传海洋生态知识,满足游客对海洋的向往,促进海洋生态系统的保护。

湿地公园的最大特色在于主题性、自然性和生态性。建成一个“森林氧吧”、满眼美景(百荷与赏鱼园等)、绿色食品生产、健康消费型生态餐厅、观海区等综合为一体的北戴河湿地公园,实现生态系统保护、生产和娱乐三者的良性循环。

4 城市湿地公园的发展前景

湿地公园建设应该保持该区域的独特的自然生态系统,并趋近于自然景观状态,维持系统内部不同动植物种的生态平衡和种群协调发展,在尽量不破坏湿地自然栖息地的基础上建设不同类型的辅助设施,将生态保护、生态旅游和生态环境教育的功能有机结合起来,实现自然资源的合理开发和生态环境的改善,最终实现人与自然和谐共处的境界。预期以以高科技为支撑,建设成为“生态型、园林式、科技型、国际

性的生态公园”,融休闲、度假、娱乐、学习、观光等功能于一身的美丽风景区。成为北戴河旅游的一个新亮点,为提升北戴河旅游品质发挥积极作用。

参考文献:

- [1] 黄成才,杨芳. 湿地公园规划设计的探讨[J]. 中南林业调查规划,2004,23(3):26—29.
- [2] 王凌,罗述金. 城市湿地景观的生态设计[J]. 中国园林,2004,(1):39—41.
- [3] 王丽学,李学森,窦孝鹏. 湿地保护的意義及我国湿地退化的原因与对策[J]. 中国水土保持,2003,(7):8—9.
- [4] 崔心红,钱又宇. 湿地公园[J]. 中国园林,2004,(4):60—61.
- [5] 易道. EDAA. 绍兴市镜湖新区国家城市湿地公园[J]. 景观设计,2006,(4):36—39.
- [6] 潮洛蒙,李小凌,俞孔坚. 城市湿地的生态功能[J]. 城市问题,2003,(3):9—12.