

杏树林冠降水截留效应及其模拟研究^{*}

任 亮^{1,2}, 任树梅¹, 杨培岭¹, 李仙岳^{1,3}

(1. 中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 水利部 综合事业局, 北京 100053; 3. 内蒙古农业大学, 呼和浩特 010018)

摘 要: 林冠截留直接影响到果树对降雨的有效利用, 通过野外测定和统计分析, 系统研究了京郊果林杏树 (Apricot) 林冠对降雨的截留特征。观测期间 (2008 年 6 - 9 月), 共观测到降雨 528.9 mm, 按以下比例被杏树林冠分配: 穿透降雨 83.2%, 林冠截留 16.0%, 树干径流 0.8%, 各分量与林外降雨的回归结果表明: 林内穿透降雨量与林外降雨量呈显著的正相关关系; 林冠截留量与林外降雨量呈显著的幂函数关系。建立杏树林分的 Horton 改进模型, 结果表明: 表征林冠吸附容量的参数 I_{cm}^* 为 2.139 mm, 表征区域降雨蒸发能力的参数 α 为 6.7%。Horton 改进模型较好地解释了林冠截留吸附、湿润与蒸发机理, 阶段模拟值和实测值有较好的一致性, 显示了 Horton 改进模型适用于京郊杏树果林冠层截留计算。

关键词: 京郊杏树果林; 林冠截留; Horton 改进模型

中图分类号: S161.41

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)01-0183-05

Canopy Distribution of Precipitation and Simulation of Apricot Forests

REN Liang^{1,2}, REN Shu-mei¹, YANG Pei-ling¹, LI Xian-yue^{1,3}

(1. College of Water Conservancy & Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. Bureau of Comprehensive Development Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China; 3. Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: Canopy interception affect the fruit trees on the effective use of rainfall directly, the relationships between canopy interception of Apricot forests and rainfall were studied by field survey and statistical analysis. Results show that the total rainfall was 528.9 mm from June to September in 2008. The rainfall was redistributed by the proportion of throughfall 83.2%, interception 16.0% and stemflow 0.8% respectively. The results show that the relationship between throughfall and total rainfall is linear and the relationship between throughfall and interception is Logarithm. Using the improved Horton model, in which the parameter I_{cm}^* means rainfall adsorption capacity of canopy (2.139 mm) and α means coefficient of canopy evaporation for this region (6.7%). The improved Horton model explain the law of crown interception composed of three physical processes (adsorption, soakage and evaporation). Simulated values and measured values have a better consistency for a period of time. We conclude that the improved Horton model can be used for estimating canopy water interception in Beijing suburbs Apricot forests.

Key words: Beijing suburbs Apricot forests; rainfall interception; the improved Horton model

京郊果林不仅是北京农村经济的重要组成部分, 而且对北京生态建设的重要性不可忽视。果林的水文生态功能是北京市生态系统功能的一个重要方面, 水在果林生态系统中的循环与分配整合了能量流动和养分循环等生态过程^[1], 其中水源涵养和水土保持是果林生态系统作用中人们最为关注的服务功能, 果

林对大气降雨的再分配是其水文效应中的重要环节。降雨进入果林后进行了一连串的再分配过程: 形成穿透降雨、树干径流、树冠截留, 降雨的分配过程受到降雨量、降雨强度、降雨历时、树冠情况及树种、树龄、林分密度等多种因素的影响和制约^[2-3]。

近 30 年来, 国内很多学者采用数学方法对林冠

^{*} 收稿日期: 2009-07-11

基金项目: 北京市科技计划项目子课题: 特色经济作物耗水规律与节水灌溉制度研究 (D0706007040191 - 08)

作者简介: 任亮 (1985 -), 男, 甘肃平凉人, 硕士, 主要从事农业节水、水资源管理等方面的研究。E-mail: renyau@126.com

通信作者: 任树梅 (1956 -), 女, 内蒙古呼和浩特人, 学士, 教授, 主要从事水文与水资源研究。E-mail: renshumei@163.com

降雨截留进行了模拟研究,主要集中在热带季节雨林、温带油松人工林、江河上游人工林等,通过经验、半理论和理论模型^[4-8]对针叶林、落叶阔叶林和混交林的降雨截留规律已作较深入的研究,但对温带半干旱地区果林截留特征报道甚罕。在我国北方半干旱地区,果林树冠的截留耗水是果园耗水中不可忽略的部分,它影响果园土壤水分的运移和分配规律。本文通过研究杏树果林对不同雨量单场降雨的截留分配效应,探讨不同降水事件下杏树果林对降水的拦截能力及差异,尝试建立盛果期杏树林冠截留的统计模型和 Horton 概念模型,就林冠对降水的分配机理与林冠截留之间的关系展开系统研究,以期对降雨高效利用的节水灌溉提供有关的指导。

1 研究地概况和研究方法

1.1 研究地概况

北京市属北温带大陆性半干旱季风气候,春天干旱多风,夏季炎热多雨,秋季多风少雨,冬季寒冷干燥。多年平均降雨量为 595 mm,80%的降雨集中在 6 - 8 月,7 - 8 月常有暴雨,年平均气温 11.8℃,年日照时数 2 684 h,年平均积温 4 600℃,全年无霜期 210 d 左右,多年平均风速 2.6 m/s。

研究所选的杏树 (Apricot) 林样地设在北京市海淀区四季青经济果树种植园内 (39°54'N, 116°23'E, 海拔 43.5 m), 1996 年定植于果园中,采用定行距密株的种植方式 (行距 4 m, 株距 3.5 m), 杏树的平均高度为 (3.11 ± 0.20) m, 平均胸径为 (13.10 ± 1.22) cm, 同行林冠郁闭度达到 0.7, 在行间没有种植其他作物。

1.2 研究方法

在单场降雨情况下,林冠水量平衡关系为^[3]:

$$P = I_c + T_f + S_t \tag{1}$$

式中: P ——林外降雨; I_c ——林冠截留量; T_f ——穿透降雨; S_t ——树干径流。

本研究中观测项目为林外降雨、穿透降雨和树干径流,观测时间从 2008 年 6 月 1 日到 2008 年 9 月 30 日,这一时期是北京雨季,降雨非常密集,并

且杏树枝叶茂盛,有一定的截留能力。

1.2.1 林外降雨测定 在林地边缘的空旷地上,布设自动气象站,连续记录观测期内的降雨及其他气象资料,同时在空旷林地用标准雨量筒观测降雨,作为对照以便进行对比分析。

1.2.2 穿透降雨测定 根据公式 $n = N / (1 + N^{2/2})$, $N = A / A$ 计算出试验区需要的雨量计个数,式中: n ——所需的雨量计个数; N ——抽取样本所代表的区域大小; α ——精度; β ——变异系数; A ——试验区面积 (m^2); A ——雨量计受雨口面积 (m^2),随机布置雨量计位置^[9],每次降雨后及时测量,并清除落入的叶片和杂物。

1.2.3 树干径流测定 杏树长势均匀,通过大量调查,树干胸径为 12.41 ~ 14.32 cm,所以在试验区选取 6 株样树,在距树干基部 30 cm 安装铁皮环状收集槽,用导水管将截持的降水收集在雨量筒中,降雨后及时测定树干截持雨量。取得总量后,用树冠投影面积计算单位面积林冠的树干径流量。

1.2.4 树冠截留量的计算 根据测定得林外降雨、穿透降雨、树干径流,由公式 (1) 得:

$$I_c = P - (T_f + S_t) \tag{2}$$

2 结果与分析

2.1 降雨特征

2008 年 6 月 1 日到 9 月 30 日期间,共观测到 26 次大气降水,平均每 4.6 d 就有 1 次降雨,降水总量为 528.9 mm,平均每次降雨量为 20.3 mm。降水事件按大小的分布频率 (表 1) 中,雨量级为 20 ~ 30 mm 的降雨量最多,占总降雨次数的 23.1%。观测期间小雨 (24 h 降雨量 < 9.9 mm) 的次数为 11 次,中雨 (24 h 降雨量 10.0 ~ 24.9 mm) 为 6 次,大雨 (24 h 降雨量 25.0 mm) 为 9 次,大雨降雨量占到这一时期总雨量的 72.2%。6 - 9 月降雨量 (见表 2) 分别为 114.0 mm、134.6 mm、209.2 mm、71.1 mm,其中 7 - 8 月份 24 h 降雨量 > 20.3 mm (次降雨均值) 为 7 次,6、9 月只有 4 次。可以见,7、8 月份次降雨量较大,也符合北京 7、8 月多大暴雨的气候规律。

表 1 各级降雨的分配

雨量级/ mm	观测 次数	频度/ %	降雨量/mm		林冠截留量		穿透降雨量		树干径流量	
			合计	平均	mm	%	mm	%	mm	%
< 1.0	2	7.7	1.0	0.5	1.0	100	0	0	0	0
1.0 ~ 5.0	7	26.9	17.6	2.5	9.2	52.2	8.4	47.5	0.05	0.3
5.0 ~ 10.0	2	7.7	16.0	8.0	3.5	22.1	12.3	77.1	0.13	0.8
10.0 ~ 20.0	4	15.4	67.2	16.8	17.9	26.6	48.8	72.7	0.49	0.7
20.0 ~ 30.0	6	23.1	157.5	26.2	28.2	17.9	128.1	81.3	1.26	0.8
30.0 ~ 50.0	2	7.7	78.2	39.1	9.7	12.4	67.9	86.8	0.64	0.8
> 50.0	3	11.5	191.4	63.8	15.6	8.2	174.2	91.0	1.62	0.8

2.2 林内降雨

林内降雨包括穿透降雨和树干径流。观测时段内,实测穿透降雨总量为 440.0 mm,树干径流总量为 4.2 mm,分别占观测降雨总量的 83.2 %、0.8 %。林冠穿透率在不同的雨量级差异明显,当林外降雨 < 1 mm 时没有产生穿透降雨,林冠几乎截留所有的降雨,当雨量级逐渐增大时,穿透率随之直线上升,雨量级 < 5 mm 时,穿透率保持在 50 % 以下,雨量级 > 5 mm 时,穿透率有跳跃式增加,达到 77.1 %。根据 26 次实测资料分析,穿透雨量、穿透率与林外降雨量的关系,分别如图 1 - 2。

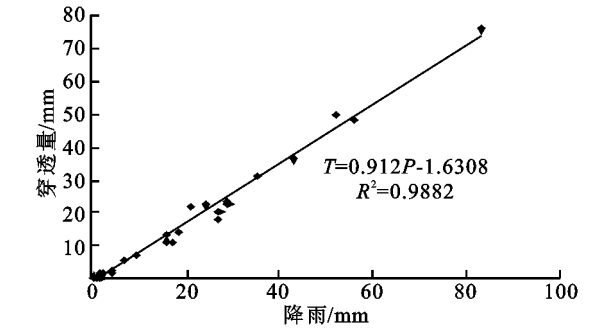


图 1 穿透量与林外降雨关系

可见林内穿透降雨与林外降雨具有显著的正相关关系。由公式可看出,当林外降雨量达到 1.63 mm 时,才能产生穿透降雨,这与实际观测的结果基本符合。穿透率与林外降雨的关系,呈显著的对数关系,当林外降雨 < 15 mm 时,穿透率随着林外降雨量的增大而急剧增大,当林外降雨 > 15 mm 时,穿透率基本保持在 80 % 左右,见图 2。

由表 1 可知,树干径流占林外降雨量的比例非常小,为 0 ~ 0.8 %,当林外降雨 < 1 mm 时,没有产生树干径流。实测的数据显示,当林外降雨达到 1.3 mm 时,就能观测到树干径流,较其他树种的研究,杏树树干易于产生径流,这与杏树树干的结构和树皮的性质有一定的关系。树干径流与林外降雨也有密切的关系,径流率随着雨量级的增大而增大,雨量级 < 5 mm 时,树干径流率保持 0.3 % 以下,雨量级 > 5 mm 时,径流率基本保持在 0.8 % 左右。由此可见,树干径流在整个降雨过程中占的比率很小,就对果树生理需要而言作用甚微,所以一般情况下,可以忽略树干径流的影响。

2.3 林冠截留

林冠对大气降雨的截留缓冲是水分输入森林进行的第一次分配,通过这次分配,降雨到达地面的数量、速度、时间均发生了变化^[10]。林冠的截留能力是有限的,林冠截留量也受到林冠结构、前期降水、雨量及雨强等因素的影响。观测时段内,通过水量平衡计算的截留总量为 85.1 mm,占观测降雨总量

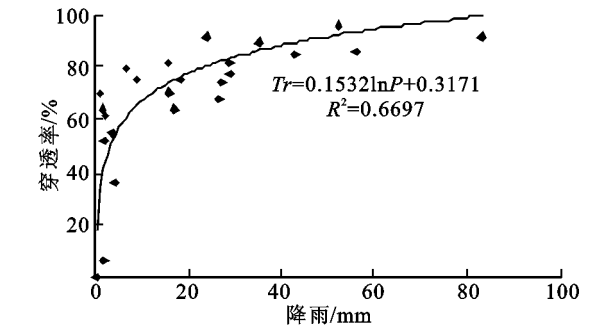


图 2 穿透率与林外降雨关系

的 16.0 %。分析截留资料,发现林冠截留量与林外降雨量可以由幂函数关系式表征(如图 3) :

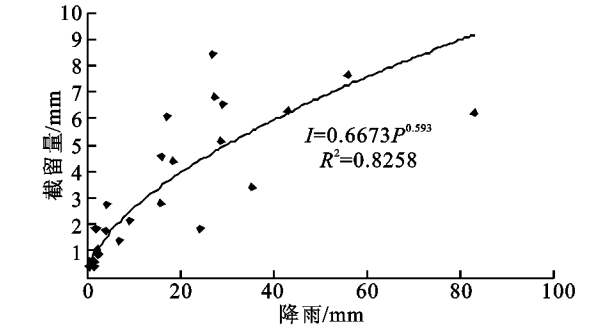


图 3 林冠截留量与林外降雨关系

在林冠截留降雨达到饱和以前,林冠截留量随着降雨量的增加而不断增加,但增加的比率越来越小,直到趋近于林冠最大持水量,并最终达到饱和。所以,林冠截留量与林外降雨量呈幂函数关系。杏树林冠的饱和持水量为 7 ~ 8 mm,反映了林冠截留降雨的有限性。由表 1 可见,当雨量级 < 5 mm 时,一半以上的降雨被林冠截留,并最终蒸发损失;当雨量级在 5.0 ~ 20.0 mm 时,林冠截留了 25 % 左右的降雨,实际到达地面的降雨为 3.75 ~ 15 mm,有较大损失,对于大面积果园的节水灌溉,这部分的林冠截留不能忽略;当雨量级 > 20 mm 时,林冠截留率在 18 % 以内,并随着雨量级的增大而逐渐减小,而这一级别的降雨可以有效缓解旱情,少量的林冠截留显得并不十分重要。由表 2 可以看出,7 - 8 月的截留率比 6 月、9 月小,这是因为研究区 6 月、9 月降水以小雨为主,很少有大暴雨发生,能够充分发挥冠层的截留作用。由上述分析可见,林冠截留不能轻易忽略,尤其雨量级较小但能起到一定缓解旱情作用时,由于截留损失,降雨将不能及时补充果林所需水分,这就需要结合人工灌溉。深入研究截留量与降雨量之间的关系,并建立适于杏树林冠截留的模型,对于果林节水灌溉具有一定的指导意义。

3 林冠截持降雨概念模型的建立

我国地域广阔,地区气候差异较大,转化成林冠截持降雨的模型也有很大不同。林冠截留概念模型

是认识林冠截留物理学过程的重要手段。在众多概念模型中, Horton 模型及其改进式按照截留机理,把截留量可分解为吸附截留和树体表面蒸发导致的附加截留^[11],较好地描述了树冠截留机制和过程,克服了统计模型参数物理意义不明确或与气象数据结合不紧密等缺点,具有较好的应用前景。Horton 模型(式 3)将吸附容量简化成一个常数,不适用于小雨量降雨事件,后来逐渐发展成了式(4)的形式^[3,12-13]。王彦辉等人^[14]对式(4)进行了必要的简化,提出了适合我国不同林分的次降雨截留模型式(5):

表 2 杏树林分不同月份降雨量和分配率

指标	6月	7月	8月	9月
降雨量/mm	114.0	134.6	209.2	71.1
透流量/mm	85.5	119.6	180.7	52.2
透流率/%	75.0	88.9	86.4	76.2
截留量/mm	27.7	14.2	26.7	16.4
截留率/%	24.3	10.4	12.8	23.1

$$I_c = I_{cm}^* + erT \quad (3)$$

$$I_c = I_{cm}^* [1 - \exp(-\frac{P}{I_{cm}^*})] + erT \quad (4)$$

$$I_c = I_{cm}^* [1 - \exp(-\frac{P}{I_{cm}^*})] + P \quad (5)$$

式中: I_c ——次降雨截留量; I_{cm}^* ——以林冠投影面积上的水层厚度表示的林冠吸附降雨容量; P ——次降雨量; e ——湿润树体表面蒸发强度; r ——树体表面积(包括叶和枝干)与树冠投影面积的比值; T ——降雨历时; ——降雨蒸发率。

之所以将式(4)中的附加截留量简化为式(5)中次降雨的比例,是因为不易测得树体表面积动态数据以及常规气象数据中缺乏次降雨历时数据。简化后,可以利用常规的气象数据,进行树冠截留功能的区域模拟和评价。以式(5)作为模型,利用标准的统计程序 SPSS 进行模型的参数估计。对实测的 26 次降雨量 P 和次降雨截留量 I_c 进行拟合,得到下式:

$$I_c = 2.139 [1 - \exp(-\frac{P}{2.139})] + 0.067 P$$

其中参数 I_{cm}^* 为 2.139, 为 0.067, 相关系数 ($n = 26$)。参数 I_{cm}^* 不仅受地域性气候特征的影响,而且直接受林分特征的影响,参数受干燥程度和风速等影响较大,结合前人的研究结果, I_{cm}^* 在经验值变化范围之内, 值则处在温带半湿润地区经验值变化范围内,这是因为观测的时段处在北京的丰水期,非常湿润导致,并没有完全体现北京全年的气候状况。对建立的模型进行效果评价,从次降雨林冠截留量来看(图 4),当实际截留量 < 4 mm 时,模拟值较接近实测值,当实际截留量 > 4 mm 时,模拟值偏小,模拟效果不是非常理想,主要原因是单次降雨

截留量受林冠干燥度、雨强、风速等因素影响,会出现较大差异。比较阶段林冠截留量的模拟值和实测值,由实测的 P 、 T_f 与 S_i 值,用公式(2)计算得到 6 - 9 月截留总量为 85.1 mm,占这一时期降雨量的 16.0%。运用 Horton 模型对观测期林冠降雨截留过程进行模拟,得到截留总量为 82.4 mm,占这时期降雨量的 15.6%,截留量比实测值低 2.7 mm;截留率低 0.4%。从累积量对比来看,显示出 Horton 模型对降雨模型做了较好的模拟。

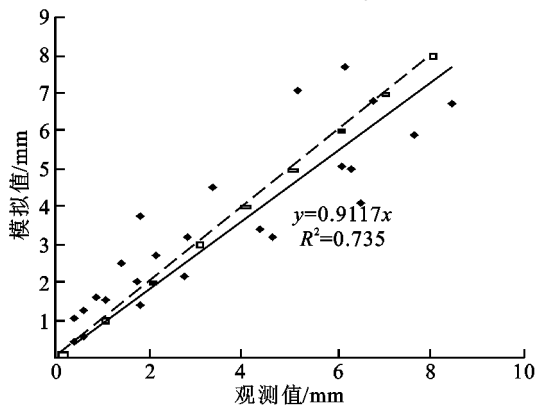


图 4 杏树果林冠层截留模拟值与观测值的比较

4 结论与讨论

林冠截留量不仅受各种气象因子的影响,而且与冠层密度、厚度、雨前冠层干燥度、叶面的持水能力、林冠结构特征等树冠性质的关系紧密^[15],因而比较复杂。通过对北京雨季 26 次观测数据的统计分析表明:

(1) 林内降雨与林外降雨具有显著的正相关关系,穿透率随着雨量级的增大而增大,雨量级 > 5 mm 时,穿透率有跳跃式增加,随后趋于稳定,穿透率和林外降雨量呈显著的对数关系。树干径流的产生和树的分枝角度、冠幅、树皮的储水能力、降雨强度等有关^[16]。杏树容易产生树干径流,但产流较少,这与杏树树皮的储水能力较低和分枝角度较大有直接关系,当雨量级 > 5 mm 时,径流率基本稳定在 0.8%。

(2) 林冠截留量与林外降雨量呈显著的幂函数关系,当林冠遇到大雨和暴雨时不能充分发挥林冠的截留能力,所以体现出大暴雨较多的 7 月、8 月截留率明显小于 6 月、9 月截留率。实际的截留过程中,由于受雨强、降雨时长、枝叶表面蒸发等因子的影响,实际截留量随着降雨量的增加而缓慢增加并趋于平稳,当降雨量 > 7 mm 时,杏树截留率趋于稳定。当降雨量 < 20 mm 时,林冠截留对降雨产生了较大影响,林内降雨量小于林外降雨量的 75%,这对果树实际的水分补给产生了一定影响,即林冠截

留不能轻易忽略,节水灌溉中应考虑截留损失。

(3) 研究表明, Horton 模型在实际截留量 < 4 mm 时,对单次降雨截留量有较好的模拟,当实际截留量 > 4 mm 时,模拟值偏小,从阶段总截留量来看, Horton 模型做了较好的模拟,模拟总量和实测总量较为接近,能够较准确估算杏树林冠对单次降雨的截留量,指导杏树的节水灌溉。其中 Horton 模型中附加截留量由于受风速、雨前冠层干燥度、温度等因素的影响,导致部分单次截留量模拟出现较大误差,能否将更多影响单次截留量因素融入模型,从而更精确地反映实际林冠截留的过程和结果,还需要进一步深入的探讨。

参考文献:

[1] Anna A, Anselm R. Trace metal fluxes in bulk deposition, through-fall and stemflow at two evergreen oak stands in NE Spain subject to different exposure to the industrial environment[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38:171-180.

[2] 王礼先,解明曙. 山地防护林水土保持水文生态效益及其信息系统[M]. 北京:中国林业出版社,1997.

[3] 中野秀章. 森林水文学[M]. 北京:中国林业出版社,1983.

[4] Calder, I R. A stochastic model of rainfall interception[J]. J. Hydrol., 1986, 89:65-71.

[5] Asdak C, Jarvis P G, van Gardingen P, et al. Rainfall interception loss in unlogged and logged forest areas of

Central Kalimantan, Indonesia[J]. Journal of Hydrology, 1998, 206:237-244.

[6] 王佑民. 我国林冠降水再分配研究综述(I) [J]. 西北林学院学报, 2000, 15(3):1-7.

[7] 王佑民. 我国林冠降水再分配研究综述() [J]. 西北林学院学报, 2000, 15(4):1-5.

[8] Chappell N A, Bidin K, Tych W. Modeling rainfall and canopy controls on net precipitation beneath selectively logged tropical forest[J]. Plant Ecology, 2001, 153:215-229.

[9] 张一平,王馨,王玉杰,等. 西双版纳地区热带季节雨林与橡胶林林冠水文效应比较研究[J]. 生态学报, 2003, 23(12):2653-2665.

[10] 刘世荣,温远光,郭泉水,等. 中国森林生态系统水文生态功能规律[M]. 北京:中国林业出版社,1996.

[11] 党宏忠,董铁狮,赵雨森. 红松林冠对降水的截留特征[J]. 东北林业大学学报, 2007, 35(10):4-6.

[12] 姚丽华. 森林降水截留的研究近况[J]. 河北林学院学报, 1988, 3(1):103-113.

[13] Aston A R. Rainfall interception by eight small trees[J]. Hydrol., 1979, 42:383-396.

[14] 王彦辉,于澎湃,徐德应,等. 林冠截留降雨模型转化和参数规律的初步研究[J]. 北京林业大学学报, 1998, 20(6):25-30.

[15] 王礼先,张志强. 森林植被变化的水文生态效应研究进展[J]. 世界林业研究, 1998, 20(6):14-22.

[16] 万师强,陈灵芝. 东灵山地区大气降水特征及森林树干径流[J]. 生态学报, 2000, 20(1):61-67.

(上接第 162 页)

参考文献:

[1] 吴良镛. 人居环境科学的探索[J]. 规划师论坛, 2001, 17(6):5-8.

[2] 吴良镛. 致力于人居环境科学的探索[J]. 规划研究, 2001(5):11-13.

[3] 吴良镛. 人居环境科学导论[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2001.

[4] Doxiadis C A. Action for Human Settlements [M]. Athens: Athens Publishing Center, 1975.

[5] 郝慧梅,任志远. 基于栅格数据的陕西省人居环境自然适宜性测评[J]. 地理学报, 2009, 64(4):498-506.

[6] 贺勇. 适宜性人居环境研究:“基本人居生态单元”的概念与方法[D]. 杭州:浙江大学, 2004.

[7] 陈永森. 滇池地区生态环境与经济综合考察报告[R]. 昆明:云南科技出版社, 1998.

[8] 云南省水利水电科学研究所. 滇池流域水土流失整治工程可行性研究报告[R]. 2002.

[9] 孙广友,王海霞,于少鹏. 城市湿地研究进展[J]. 地理

科学进展, 2004, 23(5):94-100.

[10] 傅娇艳,丁振华. 湿地生态系统服务、功能和价值评价研究进展[J]. 应用生态学报, 2007, 18(3):681-686.

[11] 徐迎. 城市湿地对城市人居环境可持续发展影响机制初探[J]. 资源与产业, 2007, 9(3):84-86.

[12] 昆明市环境科学研究所. 滇池富营养化研究[M]. 昆明:云南科技出版社, 1992.

[13] 汤国安,杨昕. Arc GIS 地理信息系统空间分析实习教程[M]. 北京:科学出版社, 2006.

[14] 封志明,唐焰,杨艳昭,等. 中国地形起伏度及其与人口分布的相关性[J]. 地理学报, 2007, 62(10):1071-1082.

[15] Niu Wenyan, Harris W M. China: The forecast of its environmental situation in the 21st century[J]. Journal of Environmental Management, 1996, 47:101-114.

[16] 国家环境保护部. 滇池流域水污染防治规划(2006 - 2010 年)[R].

[17] 封志明. 基于 GIS 的中国人居住环境指数模型的建立与应用[J]. 地理学报, 2008, 63(12):1327-1336.