

# 修河上游流域4种森林类型的水源涵养功能评价

孙浩, 刘晓勇, 何齐发, 江柳春, 徐昕

(江西省林业调查规划研究院, 南昌 330046)

**摘要:**为定量评价修河上游流域森林生态系统的水源涵养功能,对流域内4种主要森林类型(杉木林、马尾松林、阔叶林、毛竹林)枯落物层和土壤层的结构、持水性能进行了研究。结果表明:(1)4种森林类型枯落物现存量的变化范围为3.50~5.99 t/hm<sup>2</sup>,其中杉木林枯落物的现存量最大,毛竹林最小;枯落物最大持水量表现为阔叶林>马尾松林>杉木林>毛竹林,说明阔叶林的枯落物层比针叶林和毛竹林有更大的水源涵养能力;(2)4种森林类型的土壤容重表现为马尾松林>杉木林>毛竹林>阔叶林,表明4种森林类型中,阔叶林更有利于改善土壤结构;土壤水源涵养能力表现为毛竹林(376.50 t/hm<sup>2</sup>)>阔叶林(373.17 t/hm<sup>2</sup>)>马尾松林(213.50 t/hm<sup>2</sup>)>杉木林(186.42 t/hm<sup>2</sup>);(3)林分枯落物层和土壤层的综合水源涵养能力表现为毛竹林>阔叶林>马尾松林>杉木林。结果说明修河上游流域阔叶林、毛竹林的水源涵养功能优于针叶林,建议加强保护阔叶林和毛竹林,适当改造针叶林,以提高当地森林生态系统的整体水源涵养能力。

**关键词:**修河上游;水源涵养;枯落物层;土壤层

**中图分类号:**S714.2;S715.7

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2017)04-0337-05

## Assessments of Four Types of Forests on Soil Water Conservation Functions in the Upper Reaches of Xiu River

SUN Hao, LIU Xiaoyong, HE Qifa, JIANG Liuchun, XU Xin

(Institution of Forestry Survey and Planning in Jiangxi Province, Nanchang 330046, China)

**Abstract:** To understand the soil water conservation functions of different types of forests in the upper reaches of Xiu River, the eco-hydrological functions of the litterfall and soil were studied in the four main types of forests (i. e., *Cunninghamia lanceolata* forests, *Pinus massoniana* forests, broadleaved forests, *Phyllostachys heterocycla* forests). The results showed that: (1) the litter contents of the four types of forests ranged from 3.50~5.99 t/hm<sup>2</sup>, and the largest was observed in *C. lanceolata* forest, while the lowest was found in *Ph. heterocycla* forest; the largest water-holding capacities of litterfall decreased in the order: broadleaved forest>*P. massoniana* forest>*C. lanceolata* forest>*Ph. heterocycla* forest, which indicated that broadleaved forest had greater effect on soil water conservation than conifer forests; (2) the soil bulk densities in the four types of forest decreased in the sequence of *P. massoniana* forests>*C. lanceolata* forests>*Ph. heterocycla* forests>broadleaved forests, and the result showed that broadleaved forest was more beneficial to improve the soil structure; the water conservation of soil in *Ph. heterocycla* (376.50 t/hm<sup>2</sup>) forest was the largest among the four types of forests, followed by broadleaved forest (373.17 t/hm<sup>2</sup>) and *P. massoniana* forest (213.50 t/hm<sup>2</sup>), while *C. lanceolata* forest (186.42 t/hm<sup>2</sup>) was lower; (3) the comprehensive soil water conservation of litterfall and soil decreased in the sequence: *Ph. heterocycla* forests>broadleaved forests>*P. massoniana* forests>*C. lanceolata* forests. These results suggested that the soil water conservation functions of broadleaved and *Ph. heterocycla* were superior to conifer forests, so we should do more to protect broadleaved and *Ph. heterocycla*.

**Keywords:** upper reaches of Xiu river; soil water conservation functions; litterfall layer; soil layer

涵养水源是森林生态系统的重要功能之一,主要体现在森林植被层、枯枝落叶层及土壤层等对水分的调蓄与再分配等过程上<sup>[1]</sup>。枯枝落叶层和土壤层作为水源涵养效应的第二层和第三层,其持水量约占林分水源涵养能力的 85%,是林分涵养水源的主体<sup>[2]</sup>。大量研究<sup>[2-9]</sup>表明,林分类型和结构不同,其涵养水源的功能表现出明显的差异;同时,不同研究区域的不可比性和森林生态系统自身的复杂性导致研究结果的差异性,各地的结论只能代表该地区的特性,影响了研究结果的可比性和推广性。因此,要深入认识目标区域的森林涵养水源功能<sup>[2]</sup>,有必要开展针对性的研究和评价。

20 世纪后期,由于修河上游森林的过量采伐,林分结构遭到破坏,林龄结构失衡,导致水源涵养功能下降,水土流失面积逐年扩大<sup>[10]</sup>。近些年,在相关政策的引导下,修河上游严禁乱砍滥伐,积极植树造林,改善林分结构,森林覆盖率逐年提高,林分结构趋于合理,然而对造林后的森林水文功能还缺乏定量评价。因此,笔者以修河上游流域杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林、马尾松(*Pinus massoniana*)林、阔叶林和毛竹(*Phyllostachys heterocycla*)林等主要植被类型为对象,研究其林地枯落物层和土壤层的结构和持水性能等,以提高对该流域森林水源涵养功能的科学认识,为当地森林生态系统的保护策略提供科学依据。

## 1 研究区概况

本研究以修河流域上游的生态公益林为研究对象

表 1 4 种森林类型的样地基本特征

森林 类型	树高/ m	胸径/ cm	密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	郁闭度	林下植被		坡度	坡向
					主要灌木	主要草本		
杉木林	11.0	12.4	2600	0.8	鹿角杜鹃、桤木石楠、木通、乌药等	铁芒萁、苔草、狗脊等	28°	西
马尾松林	8.3	10.3	1760	0.7	榿木、崖豆藤等	铁芒萁	34°	西
阔叶林	10.5	13.2	1750	0.8	崖豆藤、朱砂根、榿木、柃木、中华绣球、猕猴桃等	铁芒萁、苔草、薜荔、淡竹叶、苦苣苔等	37°	东北
毛竹林	—	—	1200	0.65	柃木、络石、枫香、格药铃等	铁芒萁、苔草、马蹄草、贯众等	27°	北

注:鹿角杜鹃(*Rhododendron latoucheae*), 桤木石楠(*Photinia davidsoniae*), 木通(*Akebia quinata*), 乌药(*Lindera aggregate*), 铁芒萁(*Dicranopteris linearis*), 薹草(*Carex sp.*), 狗脊(*Woodwardia japonica*), 榿木(*Loropetalum chinense*), 崖豆藤(*Mallotus millietii*), 朱砂根(*Ardisia crenata*), 柃木(*Eurya japonica*), 中国绣球(*Hydrangea chinensis*), 中华猕猴桃(*Actinidia chinensis*), 薜荔(*Ficus pumila*), 淡竹叶(*Lophatherum gracile*), 苦苣苔(*Conandron ramondiioides*), 络石(*Trachelospermum jasminoides*), 枫香(*Viscum liquidambaricolum*), 格药铃(*Eurya muricata*), 积雪草(*Centella asiatica*), 贯众(*Cyrtomium fortunei*)。

### 2.2 林分郁闭度的测定方法

林分郁闭度采用样线(对角线)法测定,即树冠所截样线长度之和与样线总长的比值。

### 2.3 枯落物水分一物理性质测定<sup>[11]</sup>

用钢尺对每个枯落物样方的四个边角及中心位置的枯落物厚度共测量 5 次,取平均值,并收集每个样方内的全部枯落物(包括未分解和半分解),在不破坏原有

开展了调查研究。该地区地理坐标为东经 113°57′—114°56′,北纬 28°47′—29°22′,属于中亚热带湿润季风气候,该地区年平均气温 16.5℃,最冷月为 1 月,平均气温为 4.1℃,最热月为 7 月,平均气温为 27.4℃;初霜一般出现在 11 月中旬,终霜一般出现在 3 月中旬,年平均无霜期为 247 d;雨量充沛,年平均降雨量为 1 600 mm 左右,降雨季节分配不均匀,其中 4—6 月降雨集中,为 700~800 mm,降雨年际变化较大,最多为 2 300 mm,最少为 1 088 mm。该流域土壤平均为 80 cm 左右,土壤成土母岩,有酸性结晶岩、混质岩等,植物种类较为丰富,拥有大量的天然次生林和人工林,森林覆盖率高达 75%以上,其中针叶林主要以松、杉为主,阔叶林主要以枫香(*Liquidambar formosana*)、木荷(*Schima superba*)、拟赤杨(*Alniphyllum fortunei*)、桤木(*Alnus cremastogyne*)等为主,此外还有部分竹林和灌木分布于整个上游区域。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置

调查在修河流域上游境内展开。2015 年 10 月在全面踏查的基础上,在省二类调查固定样地内选择立地条件类型相对一致的生态公益林样地内进行调查。样地面积为 28.28 m×28.28 m(0.08 hm<sup>2</sup>),在样地四个角的外围选择与样地内生长状况相似的区域共布设 4 个 1 m×1 m 的枯落物样方,并在样地外围选择与样地内土壤质地相似的区域挖取 2 个土壤剖面,调查内容包括每木检尺、枯落物厚度及取样、土壤取样等内容。具体林分结构指标见表 1。

结构的情况下收集到密封袋内称其鲜重,并取样(约 250 g)带回实验室内烘干(在 60~80℃烘 8~10 h),测定其干重。枯落物的持水性能用浸泡法进行测定。

### 2.4 土壤水分一物理性质及化学性质测定

在样方内分 0—10,10—30,30—60 cm 三个土层取土进行试验。2015 年 10 月采用环刀法<sup>[12]</sup>测定土壤水分物理性质,每个层次内分别采集土样样品带回

实验室内,进行土壤化学性质的测定。土壤养分分析由江西省红壤研究所测定,并用土壤养分指数<sup>[13]</sup>来综合评价 4 种类型林分土壤养分水平。

2.5 土壤养分指数的计算

土壤养分指数是土壤化学性质的综合反映。其计算方法根据加乘法则,对各个肥力指标值采用乘法进行合成,计算不同森林类型土壤的养分指数,计算公式如下:

$$IFI=W_i \times F(X_i)$$

式中: $W_i$  为各肥力因子的权重向量,即通过 SPSS 软件计算各肥力因子的累计贡献率; $F(X_i)$  为各肥力因子的隶属度值,即采用连续性质的隶属度升型分布函数进行计算。

2.6 数据处理

4 种森林类型相关指标的比较均采用单因素方差分析,并用 L. S. D 检验法对各水平之间的差异进行多重比较。本文中的数据在 Microsoft Excel 2013 中整理,并在 SPSS 17.0 软件中进行了方差分析。

3 结果与分析

3.1 不同森林类型枯落物持水性能

3.1.1 不同森林类型枯落物现存量的比较 枯落物现存量与枯落物的输入量、分解程度及累积年限有直接关系,枯落物的树种组成、林龄及林分所处的水热条件等都会对枯落物的现存量有较大的影响<sup>[14]</sup>。四种森林类型枯落物现存量见表 2,从表 2 可以看出整体上表现为针叶林>阔叶林,其中杉木林枯落物的现存量最大,毛竹林最小,原因是针叶林枯落物的油脂含量较高,难于分解;而阔叶林枯落物较容易分解。进一步方差分析可知,毛竹林与其他 3 种森林类型的枯落物现存量存在显著差异( $p<0.05$ ),其他 3 种森林类型的枯落物现存量之间差异不显著。

3.1.2 不同森林类型枯落物持水性能比较 从表 2 可以看出,四种森林类型枯落物最大持水率表现为毛竹林>阔叶林>马尾松林>杉木林,最大持水量表现为阔叶林>马尾松林>杉木林>毛竹林。方差分析结果表明四种森林类型枯落物的最大持水率和最大持水量无显著性差异。最大持水量反映了林地的持

水能力,由计算结果说明阔叶林林下枯落物的持水能力优于针叶林和毛竹林林下枯落物的持水能力。

表 2 4 种森林类型枯落物现存量及持水能力

森林类型	现存量/ (t · hm <sup>-2</sup> )	最大 持水率/%	最大持水量/ (t · hm <sup>-2</sup> )
杉木林	5.99a	174.30	10.45
马尾松林	5.93a	182.42	11.94
阔叶林	5.26a	230.81	12.15
毛竹林	3.50b	268.70	9.40

注:各列不同字母表示在  $p=0.05$  水平上的显著性差异。

3.2 不同森林类型土壤化学性质的差异比较

从表 3 可以看出,除 pH 值外,阔叶林土壤养分指标基本上均处于较高值,这主要由于阔叶林林下植物种类较丰富、枯落物种类数量多及分解迅速,都有利于养分的归还和增加。采用主成分分析的方法对四种森林类型的土壤化学性质做了进一步分析,并计算了四种森林类型的土壤养分指数。第一主成分、第二主成分和第三主成分的贡献率分别为 67.89%, 17.54% 和 14.57%,即三个特征值的累计贡献率为 100%,说明三个主成分已包含了 8 个指标变量的所有信息,其中第一主成分因子受有机质、速效氮、速效钾、全氮、全磷和全钾的影响较大,第二主成分因子受 pH 值的影响较大,第三主成分因子受速效磷的影响较大。结果表明,杉木林中第一主成分值、第二主成分值和第三主成分值均较低,说明杉木林土壤中有机养分含量较低;马尾松林中第一主成分值和第二主成分值较低,第三主成分值较高,说明马尾松林仅对土壤的速效磷含量有所提高;阔叶林中第一主成分值、第二主成分值和第三主成分值均较高,说明阔叶林有利于土壤整体的有机养分的提高;毛竹林中第一主成分值和第二主成分值较高,第三主成分值较低,说明毛竹林对土壤的有机质、速效氮、速效钾、全氮、全磷、全钾等含量有所提高,对速效磷含量有所抑制。

4 种森林类型土壤养分指数变化表现为阔叶林(0.735)>毛竹林(0.657)>马尾松林(0.393)>杉木林(0.171),说明阔叶林比针叶林有更大的土壤自肥能力,因为阔叶林枯落物的分解速度优于针叶林,导致阔叶林土壤养分的归还和改造土壤结构的能力也相应提高。

表 3 4 种森林类型土壤化学性质

森林类型	pH 值	有机质/ (g · kg <sup>-1</sup> )	速效 N/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	速效 P/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	速效 K/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	全 N/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全 P/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全 K/ (g · kg <sup>-1</sup> )
杉木林	4.78	19.83	103.58	0.59	31.76	1.10	0.12	13.53
马尾松林	4.85	28.33	93.38	1.80	37.74	1.21	0.17	13.57
阔叶林	4.65	37.31	174.69	1.19	58.70	1.87	0.28	11.48
毛竹林	5.36	27.40	144.90	1.03	40.74	1.56	0.26	13.39

3.3 不同森林类型土壤水文性能

3.3.1 不同森林类型土壤水分—物理性质比较 由表 4 可知,土壤容重总的趋势是随着土层深度增加而增大,总孔隙度总的趋势呈现出先减少后增大,这可能与不同林分中植物根系在土壤中的分布深度差异有关。从土壤容重均值来看,马尾松林>杉木林>毛竹林>阔叶

林,方差分析表明,阔叶林和毛竹林分别与马尾松林差异性显著( $p<0.05$ ),其他林分之间差异不显著,表明 4 种林分中,阔叶林更有利于改善土壤容重。从总孔隙度均值来看,毛竹林>杉木林>阔叶林>马尾松林,方差分析表明,除马尾松林与其他三种林分的总孔隙度有显著性差异外( $p<0.05$ ),其他林分之间差异不显著。

表 4 4 种森林类型土壤物理性质

森林类型	土壤/ cm	容重/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	最大持水量/ %	毛管持水量/ %	非毛管孔隙/ %	毛管孔隙度/ %	总孔隙度/ %
杉木林	0—10	1.02	49.49	42.34	7.15	42.45	49.60
	10—30	1.31	36.83	32.69	5.32	42.45	47.77
	30—60	1.42	32.58	28.22	6.18	39.98	46.15
	均值	1.31	36.82	32.06	6.05	41.21	47.26
马尾松林	0—10	1.38	23.95	18.77	7.18	26.00	33.18
	10—30	1.46	22.35	18.23	6.03	26.70	32.73
	30—60	1.61	21.67	16.58	8.15	26.23	34.38
	均值	1.52	22.27	17.50	7.28	26.35	33.63
阔叶林	0—10	1.01	44.94	31.89	13.10	31.82	44.92
	10—30	1.21	36.25	26.02	12.52	31.42	43.93
	30—60	1.10	42.76	32.14	11.70	35.40	47.10
	均值	1.12	40.95	30.06	12.21	33.48	45.68
毛竹林	0—10	1.12	47.85	37.40	10.93	37.25	48.18
	10—30	1.10	48.11	37.54	11.58	39.20	50.78
	30—60	1.37	32.75	21.66	15.15	29.60	44.75
	均值	1.24	40.39	29.58	13.25	34.08	47.33

3.3.2 不同森林类型土壤贮水性能比较 森林土壤的贮水能力主要取决于土壤的非毛管孔隙度<sup>[15]</sup>,因此将土壤非毛管蓄水量即土壤有效蓄水量作为评价林分水源涵养功能和调节水分循环的一个重要指标。从图 1 可以看出,60 cm 厚的土层中,毛竹林( $376.50 \text{ t/hm}^2$ )>阔叶林( $373.17 \text{ t/hm}^2$ )>马尾松林( $213.50 \text{ t/hm}^2$ )>杉木林( $186.42 \text{ t/hm}^2$ ),方差分析表明,杉木林和马尾松林分别与阔叶林和毛竹林差异性显著( $p<0.05$ ),说明毛竹林和阔叶林具有较好的涵养水源功能。

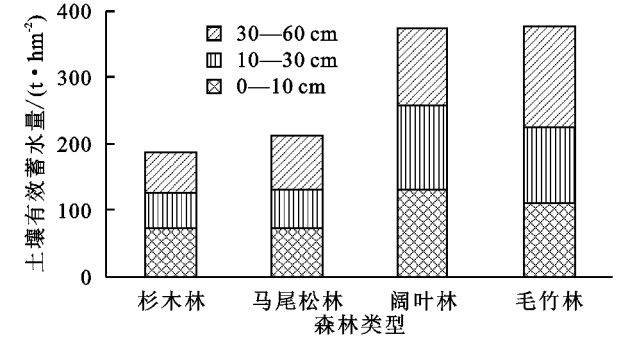


图 1 4 种森林类型土壤有效蓄水量

4 结论与讨论

4.1 讨论

4.1.1 4 种林分土壤物理性质的比较 本文对修河上游 4 种森林类型的土壤物理性质研究表明,阔叶

林、毛竹林的土壤物理指标整体优于杉木林和马尾松林,这可能与林分内植物的种类组成、植物根系的生长与分布及林地枯落物等属性有关。一方面,结合样地调查可以看出,针叶林林下枯落物较厚,阻挡了种子插入土壤和植被的发育,而阔叶林林下枯落物分解较快,为林下植物的生长提供了营养物质,促进了林下多种灌木和草本的生长,而多种植物根系的穿插生长及其在生长过程中促进微生物的活动有利于增加土壤孔隙度,使土壤容重减小<sup>[16]</sup>;另一方面,土壤有机碳是土壤团聚体形成的主要胶结剂<sup>[17]</sup>,通过对 4 种林分土壤化学性质测定发现,阔叶林的有机质含量明显高于其他林分,这主要是由于阔叶林枯落物的分解速度大于针叶林,其养分归还速率和归还量也较大,提高了土壤有机质等养分含量,从而有利于土壤团粒结构的形成<sup>[18]</sup>;相对来说,针叶林针叶化严重、枯落物较厚,所含营养物质含量少且难分解,同时又不利于团聚体的形成和养分元素的回归<sup>[19]</sup>。

一般认为<sup>[20]</sup>,土壤中大小孔隙同时存在,总孔隙度在 50%左右,其中非毛管孔隙度占 20%~40%时,土壤的通气性、透水性和持水能力比较协调,结合 4 种林分土壤孔隙度的调查结果,阔叶林、毛竹林和杉木林的总孔隙度约为 50%,但 3 种林分非毛管孔隙度所占比例分

别为:26.7%,28.0%和12.8%,由此说明阔叶林和毛竹林的土壤结构特性更合理,更有利于水源涵养。

4.1.2 4种林分土壤肥力与水源涵养功能的分析 部分专家学者对土壤化学性质与林分涵养水源能力的关系研究发现,土壤化学状况较好的林地相对于土壤化学性质较差的林地有更好的蓄水能力,对土壤的化学性质与土壤蓄水能力指标进行相关性分析,发现二者呈较好的相关性。分析原因,一方面较好的土壤化学性质促进了植被的生长,而生物生长过程改变了土壤的物理性质及其他性质,最终导致了土壤水源涵养功能的提高<sup>[21]</sup>;另一方面,土壤养分对植物的有效性是决定植物生产力、植物分布的异质性和生活型的一个重要因子<sup>[2]</sup>,林分结构的复杂性有利于林分水源涵养功能的提高<sup>[22]</sup>,从而提高降水的利用率,减少土壤养分、水分的流失,从而进一步提高林分的土壤肥力。因此,两者是相辅相成的。

本文通过对4种林分土壤肥力指数计算得出阔叶林土壤肥力优于针叶林,其中阔叶林最优;在土壤蓄水能力比较中,阔叶林优于针叶林,这与张洪江等<sup>[23]</sup>、陈严武等<sup>[24]</sup>的研究结论一致,说明在今后生态公益林的保护和建设中,应加大对阔叶林的保护和种植。

## 4.2 结论

(1) 4种森林类型枯落物现存量的变化范围为3.50~5.99 t/hm<sup>2</sup>,整体上表现为针叶林>阔叶林,其中杉木林枯落物的现存量最大,毛竹林最小,方差分析表明毛竹林与其他3种森林类型的枯落物现存量存在显著差异( $p<0.05$ ),其他3种森林类型的枯落物现存量之间差异不显著。4种森林类型枯落物最大持水率表现为毛竹林>阔叶林>马尾松林>杉木林,最大持水量表现为阔叶林>马尾松林>杉木林>毛竹林。方差分析结果表明4种森林类型枯落物的最大持水率和最大持水量无显著性差异。从枯落物最大持水量的结果来看,阔叶林>针叶林,说明阔叶林的枯落物层比针叶林有更大的水源涵养能力。

(2) 4种森林类型的土壤容重表现为阔叶林>毛竹林>杉木林>马尾松林,方差分析认为阔叶林和毛竹林分别与马尾松林差异性显著( $p<0.05$ ),其他林分之间差异性不显著,表明4种林分中,阔叶林更有利于改善土壤容重。不同森林类型土壤涵养水源能力存在差异,60 cm厚的土层中,毛竹林具有良好的涵养水源能力,为376.50 t/hm<sup>2</sup>,其次为阔叶林373.17 t/hm<sup>2</sup>,马尾松林为213.50 t/hm<sup>2</sup>,杉木林涵养水源能力较差,为186.42 t/hm<sup>2</sup>,说明毛竹林和阔叶林具有较好的涵养水源功能。

(3) 由以上结果可知,4种森林类型的枯落物层

和土壤层的综合水源涵养能力表现为毛竹林>阔叶林>马尾松林>杉木林,说明毛竹林和阔叶林的水源涵养能力优于针叶林,因此建议在今后的林分改造和建设中,应注重加强阔叶林和毛竹林的保护,并对针叶林进行改造,以提高森林生态系统的稳定性和水源涵养能力的有效发挥。

## 参考文献:

- [1] 时忠杰,王彦辉,于澎涛,等.宁夏六盘山林区几种主要森林植被生态水文功能研究[J].水土保持学报,2005,19(3):134-138.
- [2] 高岗,秦富仓,姚云峰,等.农牧交错带小流域防护林水源涵养功能研究[J].干旱区资源与环境,2009,23(8):180-185.
- [3] 钟剑飞,刘东兰,郑小贤.水源涵养林结构与功能量化研究进展[J].现代农业科学,2009,16(3):110-112.
- [4] 杨春时.系统论信息论控制论浅说[M].北京:中国广播电视出版社,1987:23-24.
- [5] Crockford R H, Richardson D P. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate[J]. Hydrological Processes, 2000,14(16/17):2903-2920.
- [6] Bruijnzeel L A. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2004,104(1):185-228.
- [7] 王会利,唐玉贵,韦娇媚.低效林改造对土壤理化性质及水源涵养功能的影响[J].中国水土保持科学,2010,8(5):72-78.
- [8] Dietz J, Hölscher D, Leuschner C. Rainfall partitioning in relation to forest structure in differently managed montane forest stands in Central Sulawesi, Indonesia [J]. Forest Ecology and Management, 2006,237(1):170-178.
- [9] 马惠,张洪江,王伟,等.重庆市四面山不同森林类型林冠的截留作用[J].中国水土保持科学,2010,8(6):108-114.
- [10] 黄国勤.江西修河流域生态系统研究[J].江西农业大学学报:自然科学版,2002,24(6):873-877.
- [11] 陈琳,赵廷宁,赵陟峰.晋西半干旱黄土地区典型林分枯落物及土壤水文效应[J].安徽农业科学,2011,39(23):14106-14108.
- [12] 国家林业局.森林生态系统长期定位观测方法[S].中华人民共和国林业行业标准(LY/T1952-2011):31-36.
- [13] 张庆费,宋永昌,由文辉.浙江天童植物群落此生演替与土壤肥力关系[J].生态学报,1999,19(2):174-178.
- [14] 樊登星,余新晓,岳永杰,等.北京西山不同林分枯落物层持水特性研究[J].北京林业大学学报,2008,30(S2):177-181.
- [15] 马雪华.森林水文学[M].北京:中国林业出版社,1993.

改善和优化当地农业生产条件;在保护现有的草地和林地的基础上,种植耐旱的草本;以生态保护为主,有序引导人口转移,经济建设应以点、线为主,禁止大面积的开发活动;此外,应转变人们的消费观念,培养生态伦理观念,从而实现人地关系的和谐可持续发展。

文章针对研究区土地利用实际生态安全问题,建立了较为系统的生态安全评价指标体系,各项指标指示意义明确,计算方法较科学,且具有一定的地域性特色。由于研究区土地生态系统生态问题复杂多样,文章所选取的指标均是可比性的指标。文章的生态安全指数评价模型具有一般性,因此,如何构建更加精确的评价模型是今后进一步研究需要加强的主要内容之一。此外,文章采用数据来源众多,统计口径不一,统一矢量化为 30 m×30 m 栅格评价尺度时,可能存在尺度转换上的误差,对评价结果有一定影响。

#### 参考文献:

- [1] 唐华俊,吴文斌,杨鹏. 土地利用/覆被变化(LUCC)模型研究进展[J]. 地理学报,2009,64(4):456-468.
- [2] 吕建树,吴泉源,张祖陆,等. 基于 RS 和 GIS 的济宁市土地利用变化及生态安全研究[J]. 地理科学,2012,32(8):928-934.
- [3] 曲青林,曹爱霞,刘学录. 兰州市土地利用生态安全评价[J]. 环境科学研究,2009,22(6):753-756.
- [4] 蒙古军,朱利凯,杨倩,等. 鄂尔多斯市土地利用生态安全格局构建[J]. 生态学报,2012,32(21):6755-6766.
- [5] 谢花林. 基于 GIS 的典型农牧交错区土地利用生态安全评价[J]. 生态学杂志,2008,27(1):135-139.
- [6] McHarg I L, Mumford L. Design with nature[M]. New York: American Museum of Natural History, 1969.
- [7] Campbell J C, Radke J. An application of linear programming and geographic information systems: Cropland allocation in Antigua [J]. Environment and Planning, 1992,24(4):535-549.
- [8] Kishindo P. Land reform and agricultural development: the case of Lesotho[J]. Journal of Rural Development, 1994,13(3):319-326.
- [9] Hughey K F D, Cullen R, Kerr G N. Application of the pressure-state-response framework to perceptions reporting of the state of the New Zealand environment [J]. Journal of Environmental Management, 2004,70(1):85-93.
- [10] Tran L T, Knight C. Fuzzy decision analysis for integrated environmental vulnerability assessment of the Mid Atlantic region [J]. Environment Manage, 2002,29(6):845-859.
- [11] Steven M B. An Ecosystem model for assessing ecological risks in Quebec rivers, lakes, and reservoirs [J]. Ecological Modeling, 1999,124(1):43-67.
- [12] Robin S V. Developing programs to monitor ecosystem health and effectiveness of management practices on lakes states national forests, USA [J]. Biological Conservation, 1997,80(3):289-302.
- [13] 曲青林,曹爱霞,刘学录. 兰州市土地利用生态安全评价[J]. 环境科学研究,2009,22(6):753-756.
- [14] 皇甫川流域土地利用变化与生态安全评价[J]. 地理学报,2006,61(6):645-653.
- [15] 林佳,宋戈,宋思铭. 景观结构动态变化及其土地利用生态安全:以建三江垦区为例[J]. 生态学报,2011,31(20):5918-5927.
- [16] 杨春红,张正栋,田楠楠,等. 基于 P-S-R 模型的汕头市土地生态安全评价[J]. 水土保持研究,2012,19(3):209-214.
- [17] 卢金发,尤联元,陈浩,等. 内蒙古锡林浩特市生态安全评价于土地利用调整[J]. 资源科学,2004,26(2):108-114.
- [18] 陈西蕊,张蓉珍. 基于 P-S-R 模型的陕西省土地资源生态安全动态评价[J]. 南方农业学报,2011,42(2):224-228.

(上接第 341 页)

- [16] 黎建强,张洪江,程金花,等. 长江上游不同植物篱系统的土壤物理性质[J]. 应用生态学报,2011,22(2):418-424.
- [17] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. Soil and Tillage Research, 2004,79(1):7-31.
- [18] 王会利,唐玉贵,韦娟娟. 低效林改造对土壤理化性质及水源涵养功能的影响[J]. 中国水土保持科学,2010,8(5):72-78.
- [19] 王树力,沈海燕,孙悦,等. 长白落叶松纯林改造对林地土壤性质的影响[J]. 中国水土保持科学,2009,7(6):98-103.
- [20] 北京林业大学. 土壤学[M]. 北京:中国林业出版社,1993.
- [21] 李沛霖. 杉木林土壤理化性质与水源涵养功能及相关性研究:以福寿林场为例[D]. 长沙:中南林业科技大学,2014:37.
- [22] 胡建忠,郑佳丽,张春霞. 黄河上游退耕地植被组成、结构及水土保持功能评价[J]. 中国水土保持科学,2005,3(2):42-50.
- [23] 张洪江,杜士才. 重庆四面山森林植物群落及其水土保持与水文生态功能[M]. 北京:科学出版社,2010:238.
- [24] 陈延武,史正涛,曾建军,等. 水源地不同林分水源涵养功能评价[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(2):67-74.