

# 基于氮磷输出风险控制的小流域 土地利用结构优化研究

于兴修<sup>1</sup>, 李建华<sup>1,2</sup>, 刘前进<sup>1</sup>, 吴元芝<sup>1</sup>, 孙棋棋<sup>1,2</sup>, 高 燕<sup>1,2</sup>

(1.临沂大学水土保持与环境保育研究所 山东省水土保持与环境保育重点实验室, 山东 临沂 276005;

2.山东师范大学人口资源与环境学院, 山东 济南 250014)

**摘要:**以沂蒙山区典型小流域——双河峪小流域为研究对象,将线性规划模型与GIS有效耦合,以控制N、P等面源污染物输出与增加经济效益作为土地利用优化配置首要目标,以地块为单元对研究区土地利用结构进行优化配置。结果表明:线性规划模型与GIS有效结合,使土地利用优化配置结果既具有面积上的约束,又同时与具体的空间位置相匹配;将N、P等面源污染物输出纳入土地利用优化配置所考虑的因素当中,使配置结果兼顾经济与环境效益的统一;双河峪小流域优化方案提高园地与林地面积,降低了耕地与未利用地面积比重,N、P年输出量降低15.3%,年经济效益提高41%。

**关 键 词:**沂蒙山区;氮磷输出;土地利用;线性规划;GIS

**中图分类号:**X506/X522

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-0690(2013)09-1111-06

山地占中国国土面积的2/3,承载着全国1/5的人口<sup>[1]</sup>,而山区是易于发生农业面源污染、农田生产力降低的脆弱地区<sup>[2]</sup>,土地退化风险比平原高10%~30%<sup>[3]</sup>,山地的开发利用直接关系到山区环境与经济的健康发展。因此,在遵循自然规律及现状土地格局的基础上,促进山地土地利用的优化配置,是山区可持续发展的必然选择<sup>[4]</sup>。

在土地利用优化配置中,线性规划模型应用较为成熟<sup>[5-7]</sup>,但多以经济效益作为线性规划模型的目标,缺乏对环境效益,如面源污染物输出风险等的考虑,且线性规划模型只能对不同土地利用类型在面积上进行优化,并不能解决土地利用的空间配置问题。随着20世纪90年代黄杏元等将拥有土地利用空间配置功能的GIS应用引入到土地评价当中<sup>[8]</sup>,弥补单一规划模型的不足<sup>[9-11]</sup>。因此将线性规划模型与GIS有效耦合,是解决土地利用优化配置的有效途径<sup>[12,13]</sup>。

沂蒙山区是北方土石山区的典型代表,山区土壤表层疏松、土层浅薄且夹杂砾石、人口密度大,生态问题已成为制约山区可持续发展的瓶颈<sup>[14,15]</sup>。本

研究利用典型小流域野外原位观测小区监测自然降雨条件下不同土地利用N、P等面源污染物年输出风险,同时运用GIS与线性规划模型技术,以小流域N、P等面源污染物年输出风险最小和经济效益最大为目标,对其土地利用结构进行空间优化,以期沂蒙山区土地资源利用与生态建设提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

双河峪小流域位于沂蒙山区重要水源地——云蒙湖库区(117°45′~118°23′E, 35°27′~36°20′N),年平均气温13.7℃,海拔高度170~500 m。降水主要集中在7月下旬至9月中旬,多年平均降水量733.4 mm,属暖温带大陆性季风气候(图1)。土壤以棕壤为主,耕地土层≤50 cm,坡耕地面积广大,集中降雨条件易造成严重的水土流失。双河峪小流域是该区典型农业小流域,总面积为2.497 hm<sup>2</sup>,其中以花生种植为主的耕地0.689 hm<sup>2</sup>,以桃园为主的园地0.999 hm<sup>2</sup>,以白杨为主的林地0.037 hm<sup>2</sup>,未利用地0.569 hm<sup>2</sup>。

收稿日期:2012-12-18; 修订日期:2013-02-11

基金项目:国家自然科学基金项目(41101263)、临沂市重大科技创新项目(201011019)、山东省科技攻关项目(2011GGH21704)资助。

作者简介:于兴修(1967-),男,山东莒县人,教授,博士生导师,主要从事资源利用与环境效应研究。E-mail:yuxingxiu@lyu.edu.cn

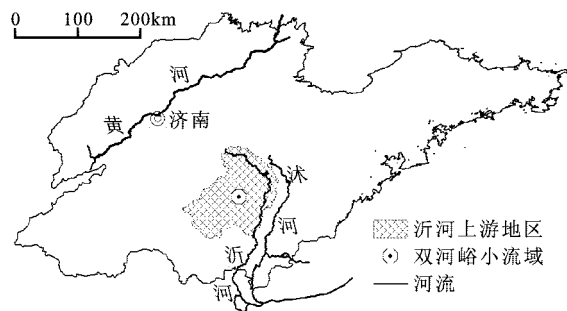


图1 双河峪小流域位置

Fig.1 Location of Shuangheyu small watershed

## 1.2 研究方法

1) 不同土地利用N、P年输出量的测定。采用自然降雨条件下野外原位观测小区试验。试验共设4种处理小区,分别布设在耕地、果园、林地以及荒坡,每种处理小区设置3次重复。其中,布设在园地、林地、未利用地试验小区面积 $2\text{ m}^2$ (长 $2\text{ m}$ ×宽 $1\text{ m}$ ),耕地以分布最广的花生地布设小区,选取花生地垄间宽( $0.8\text{ m}$ )与垄长( $15\text{ m}$ )围成。小区边界用 $30\text{ cm}$ 高PVC板围成,将PVC板插入土中 $20\text{ cm}$ ,外露 $10\text{ cm}$ ,防止小区内水分渗透及降雨溅出,小区出口处埋设自带刻度 $100\text{ L}$ PVC桶设为地表径流观测样点,承接地表径流与泥沙。雨后将小区PVC桶内泥沙与水样混匀,用 $500\text{ mL}$ PVC瓶采样,样品经酸化后测定项目包括Total Phosphorus(TP)、Total Nitrogen(TN)及泥沙。

2) 土地适应性评价方法。采用野外调查与Real-Time Kinematics(RTK)实地测量获取双河峪小流域土地利用类型属性数据与空间数据,将地形地貌、土壤质地、灌溉条件等相近的地块测量为同一土地利用评价单元。采用单因子评价<sup>[15,16]</sup>与综合评价相结合的方法对双河峪小流域的土地适宜性进行评价。

单因子评价按照因子作用的显著区间进行等级划分,然后根据每个等级影响评价项目的程度赋分,分值越大,则其适应程度越高。

单因子评价只能说明不同土地利用对单一因子的适宜程度,而要说明评价单元整体对不同土地利用的适宜状况,则需要综合考虑各评价因子的作用,本研究采用限制因子法<sup>[17,18]</sup>与平均值法对各因子进行综合评价<sup>[19]</sup>。具体方法为,在所有考虑的评价因子中,如果所有单因子赋分 $\geq 50$ ,即表示没有严重限制性因子,则选取平均值作为该评价

单元综合评价最终分值;如果有一个或多个单因子赋分 $<50$ ,而平均值 $\geq 80$ ,则给与评价单元标准值 $75$ ,若平均值 $<80$ ,则取最大限制性因子作为评价单元的最终分值。限制性因子评价模型为:

$$Q_i = \min(A_{ij}) \quad (i=1,2,3\cdots n, j=1,2,3\cdots m) \quad (1)$$

式中, $Q_i$ 为第 $i$ 个评价单元的最终分值, $A_{ij}$ 为第 $i$ 单元,第 $j$ 个参评因子最终分值。综合评价逻辑模型为(图2)。

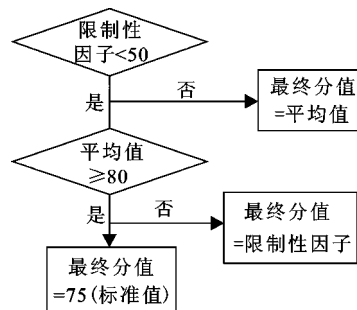


图2 综合评价逻辑模型

Fig. 2 The logical model of comprehensive evaluation

3) 土地利用结构优化配置。在土地适宜性评价的基础上构建线性规划模型,其任务是在满足多个优化目标的情况下,计算不同土地利用的最优面积值,然后借助GIS对每种土地利用进行空间配置。线性规划目标模型为:

$$\max Z_1(x) = \sum_{i=1}^n a_i x_i \quad (2)$$

$$\min Z_2(x) = \sum_{i=1}^n c_i x_i \quad (3)$$

式中, $\max Z_1(x)$ 表示流域最大经济效益(元/a), $\min Z_2(x)$ 表示流域N、P污染物最小输出量(mg/a), $x_i$ 表示 $i$ 类土地利用面积, $a_i$ 与 $c_i$ 分别为 $i$ 类土地利用单位面积经济效益[元/(a·m<sup>2</sup>)]与N、P输出量[mg/(a·m<sup>2</sup>)].线性规划约束模型为:

$$\sum_{i=1}^n x_i = S \quad (4)$$

$$x_i = (\leq, \geq) b_i \quad (5)$$

$$x_i \geq 0 \quad (6)$$

式中, $x_i$ 表示第 $i$ 种土地利用面积, $S$ 表示流域总面积, $b_i$ 表示第 $i$ 种土地利用适宜性评价常数。

在Matlab7.01软件中利用多目标求解算法解算模型,得到土地利用初步规划方案,利用ArcGIS9.3完成土地利用的空间配置。

2 结果与分析

2.1 双河峪小流域不同土地利用N、P年输出量

本研究对2011年雨季(7~10月)的自然降雨进行了监测,共监测到8场有效降雨,利用各小区监测的8场降雨下N、P流失总量估算研究区不同土地利用类型的N、P年输出量。8场降雨特征及不同土地利用8场降雨条件下氮磷输出总量见表1与表2。

表1 降雨特征

Table 1 Rainfall characteristics					
日 期	降雨量 (mm)	降雨历时 (h)	最大雨强 (mm/min)	平均雨强 (mm/min)	降雨型
2011-8-6	24.7	2.2	0.96	0.21	中雨
2011-8-11	46.2	1.7	1.27	0.46	大雨
2011-8-15	6.3	0.7	0.20	0.16	小雨
2011-8-20	74.0	20.5	0.14	0.06	暴雨
2011-8-29	57.0	13.5	0.67	0.07	暴雨
2011-9-14	34.1	1.8	0.97	0.31	大雨
2011-9-18	24.5	13.0	0.06	0.03	中雨
2011-9-29	25.5	10.0	0.47	0.04	大雨

表2 不同土地利用N、P年输出总量

Table 2 N and P annual output loads of different land use types					
土地利用	面积 (m <sup>2</sup> )	N素负荷 (mg/m <sup>2</sup> )	P素负荷 (mg/m <sup>2</sup> )	N、P总负荷 (mg/m <sup>2</sup> )	N、P输出 总量(g)
耕地	6890	25.63	6.13	31.76	218.83
园地	9991	22.82	5.52	28.34	283.15
林地	372	17.38	4.82	22.20	8.26
未利用地	5691	32.51	17.52	50.03	284.72

2.2 双河峪小流域土地适宜性评价

土地适宜性评价因子的选取遵循主导性、差异性、稳定性原则。根据双河峪小流域特征,其地形要素中的坡度因素、水文要素中的灌溉距离及土壤要素中的土层厚度在空间上具有较大差异性,是影响土地利用规划的主导因素,且具有一定程度的稳定性与数据获取的可行性,因此将坡度、土层厚度、灌溉距离作为双河峪小流域土地适宜性评价因子,分别对其进行单因子评价(表3~5)。本研究中4种土地利用类型单因子评价分级的临界值,征求了当地农业专家及农户的意见,充分考虑了不同土地利用对各因子的要求。

采用限制性因子法与平均值法对单因子评价结果进行综合评价,并按照土地适宜性评价常规

做法,将流域内土地针对不同土地利用划分为高度适宜、中等适宜、临界适宜与不适宜4个等级,并赋予不同的分值区间(表6)。

表3 坡度等级赋分

Table 3 Slope levels score						
土地利用	坡度等级					
耕地 (花生)	指标(°)	0~2	2~6	6~15	15~25	>25
	等级	I	II	III	IV	V
	赋分	100	95	85	60	25
园地 (桃树)	指标(°)	0~10	10~15	15~25	25~35	>35
	等级	I	II	III	IV	V
	赋分	100	95	85	65	40
林地 (杨树)	指标(°)	0~10	10~15	15~20	20~35	>35
	等级	I	II	III	IV	V
	赋分	100	95	85	60	40
未利 用地	指标(°)	0~5	5~15	15~25	25~40	>40
	等级	I	II	III	IV	V
	赋分	100	95	85	60	40

表4 灌溉距离等级赋分

Table 4 Irrigation distance levels score						
土地利用	灌溉距离等级					
耕地 (花生)	指标(m)	0~100	100~150	150~250	>250	-
	等级	I	II	III	IV	-
	赋分	100	85	60	40	-
园地 (桃树)	指标(m)	0~50	50~100	100~150	150~200	>200
	等级	I	II	III	IV	V
	赋分	100	85	60	40	25
林地 (杨树)	指标(m)	0~50	50~100	100~150	150~200	>200
	等级	I	II	III	IV	V
	赋分	100	85	60	40	25
未利 用地	指标(m)	-	-	-	-	-
	等级	-	-	-	-	-
	赋分	-	-	-	-	-

注:未利用地灌溉量为0,赋分值为100。

2.3 双河峪小流域土地利用结构优化

1) 线性规划模型参数。土地利用结构的优化过程是利用不同土地利用适宜性评价结果,构建线性规划模型约束条件,面向面源污染输出最小与经济效益最大两个目标,计算流域内不同土地利用最优组合面积的过程。线性规划模型约束条件:

表5 土壤深度等级赋分

Table 5 Soil depth levels score

土地利用		土壤深度等级					
耕地 (花生)	指标(cm)	0~10	10~15	15~25	25~35	>35	
	等级	I	II	III	IV	V	
	赋分	0	40	60	85	100	
园地 (桃树)	指标(cm)	0~30	30~50	50~70	70~90	>90	
	等级	I	II	III	IV	V	
	赋分	0	40	60	85	100	
林地 (杨树)	指标(cm)	0~25	25~50	50~75	75~100	>100	
	等级	I	II	III	IV	V	
	赋分	25	40	60	85	100	
未利用地	指标(cm)	0~5	5~10	>10	-	-	
	等级	I	II	III	-	-	
	赋分	40	60	100	-	-	

表6 不同土地利用适宜性面积

Table 6 Suitability area of different land use types

适宜性等级	综合评价分值	耕地(m <sup>2</sup> )	园地(m <sup>2</sup> )	林地(m <sup>2</sup> )	未利用地(m <sup>2</sup> )
高度适宜	81~100	2046	3640	3425	21803
中等适宜	61~80	1744	1503	2309	534
临界适宜	41~60	6171	15231	15164	433
不适宜	0~40	12983	2570	2046	174

① 总面积约  $X_1+X_2+X_3+X_4=22\ 944$ ; ② 耕地面积约束:  $1\ 488\leq X_1\leq 9\ 961$ ; ③ 果园面积约束:  $6\ 750\leq X_2\leq 20\ 374$ ; ④ 林地面积约束:  $372\leq X_3\leq 20\ 898$ ; ⑤ 未利用地面积=607; ⑥ 非零约束:  $0\leq X_1, 0\leq X_2, 0\leq X_3, 0\leq X_4$ 。其中,耕地、果园、林地约束面积下限由现有最佳利用地块面积决定,上限由高度适宜、中等适宜及临界适宜面积之和确定,未利用地为不适宜与临界适宜面积之和。模型主要参数见表7。

表7 模型输入参数

Table 7 Model parameters

模型参数	$X_1$ (耕地)	$X_2$ (园地)	$X_3$ (林地)	$X_4$ (未利用地)
价值系数[元/(a.m <sup>2</sup> )]	4	13.50	2.30	0
N、P输出系数(mg/m <sup>2</sup> )	31.76	28.34	22.20	50.03

注:农产品价格根据2011年实际价格计算。

2) 双河峪小流域土地利用优化方案及空间配置。考虑到流域内近些年荒地的不合理开发,尤其是河流源头大量荒地开垦为耕地,加重了流域水土流失,因此,在尊重现有土地利用格局与线性规划模型所计算最优面积的基础上,根据流域水土流失现状,将优化顺序定为未利用地、果园、林地、耕地。双河峪小流域土地利用优化方案及空间配置结果与现状对比见表8,空间配置结果见图3。

3) 双河峪小流域土地利用优化结果分析。双河峪小流域优化方案中,园地及林地面积较利用现状分别增加52.3%,8.2倍,而耕地及荒地面积分别减少38.3%,89.3%。

从环境效益上来看,土地利用现状中严重的水土流失发生在河流周边及其源头,优化方案将河流周边及其源头耕地与未利用地规划为林地,降低了水土流失风险。土地利用现状中园地及其耕地包裹着片状分布的众多荒地,一方面不利于同一土地利用集中管理;另一方面未利用地N、P年输出量高达284.72 g,养分流失明显,优化方案将耕地及园地集中规划,既达到同一土地利用集中管理的目的,又压缩荒地面积,使N、P年输出量减少89.3%,从而使优化方案较之现状N、P年输出量减少15.3%。

从经济效益上来看,不同土地利用集中成片,

表8 优化方案与现状土地利用结构对比

Table 8 Comparison between optimization program and current land use structure

土地 利用	利用现状			优化方案		
	面积(m <sup>2</sup> )	经济效益(元)	N、P输出(g)	面积(m <sup>2</sup> )	经济效益(元)	N、P输出(g)
耕地	6890	27560.0	218.83	4254	17016.0	135.71
园地	9991	134878.5	2831.45	15212	205362.0	431.11
林地	372	855.6	8.26	3418	7861.4	758.80
未利用地	5691	0	284.72	607	0	30.37
总计	22944	163294.1	794.95	22944	230239.4	673.06



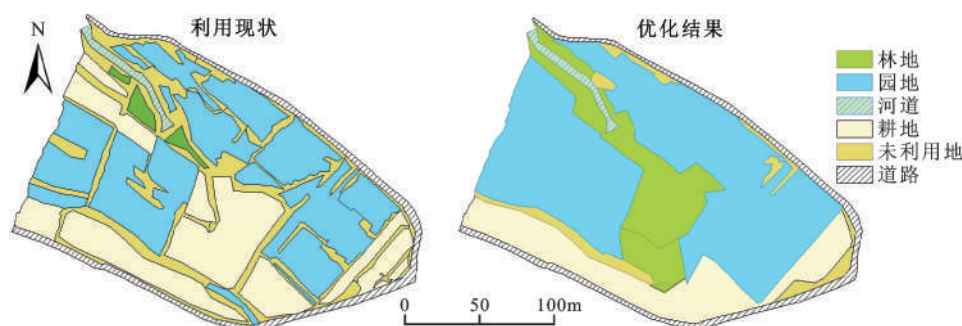


图3 双河峪小流域土地利用优化空间配置方案与现状对比

Fig. 3 Comparison between space optimization allocation program and current situation of land use in Shuangheyu small watershed

既便于管理又降低经营成本,其中园地经济效益最优,规划面积增加后,其效益增加52.3%,林地效益提高了8.2倍,耕地效益相对降低38.3%。总体上看,流域年经济效益提高41%,其中面积占优的果园对优化方案经济效益增加值贡献最为明显。

### 3 结 论

1) 采用单因子评价与综合评价相结合的方法进行中小尺度土地适宜性评价,评价方法更加简便、易于操作,各种参数获取的可行性高,与研究区特征更为一致。

2) 将优化分析能力占优的线性规划模型与具有强大空间配置功能的GIS有效耦合,充分弥补了线性规划模型与GIS的不足,使得土地利用优化配置结果既具有面积上的约束,同时又与具体的空间位置相匹配,增强了优化结果的科学性与可视性。

3) 将N、P等面源污染物输出风险纳入土地利用优化配置所考虑的因素当中,建立面源污染物输出最小与经济效益最大两个线性规划目标模型,使得土地利用优化配置结果兼顾了经济效益与环境效益的统一。

4) 对沂蒙山区典型小流域——双河峪小流域进行的土地利用优化配置及野外监测试验表明,园地具有较高的经济效益与相对较低的N、P输出风险,且在空间配置上具有较强的灵活性,因此,园地是影响该流域土地利用优化配置的重要因素,在优化配置中应对园地给予重视。

### 参考文献:

- [1] 刘彦随.山地土地结构格局与土地利用优化配置[J].地理科学,1999,19(6):504~509.
- [2] 李月臣,刘春霞.北方13省土地利用/覆盖动态变化分析[J].地

理科学,2007,27(1):45~52.

- [3] 闫慧敏,刘纪远,曹明奎.中国农田生产力变化的空间格局及地形控制作用[J].地理学报,2007,62(2):171~180.
- [4] 何毓蓉,周红艺,张保华,等.四川省耕地地力生产潜力及承载力研究[J].地理科学,2004,24(1):20~25.
- [5] Stoorvogel J J, Schippe R A, Jansen D M. USTED a methodology for a quantitative analysis of land use scenarios[J]. Netherlands Journal Agricultural Science, 1995, 43: 5-18.
- [6] 程叶青.农业地域系统演变的动态模拟与优化调控研究——以东北地区为例[J].地理科学,2010,30(1):60~65.
- [7] Caroline Jongkamp, Maarten van't Zelfde, Wouter T de Groot. Land use modelling connecting spatially explicit data and linear programming: an exploration in Ecuador[D]. Leiden: Institute of Environmental Sciences (CML), Leiden University, 2011.
- [8] 黄杏元,倪绍祥,徐寿成.地理信息系统支持区域土地利用决策的研究[J].地理学报,1993,48(2):114~121.
- [9] Qiu Bingwen, Chi Tianhe, Wang Qinmin. Fruit tree suitability assessment using GIS and multi-criteria evaluation[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(6): 96-100.
- [10] 黄妮,刘殿伟,王宗明,等.基于GIS的三江平原退耕还湿空间决策分析[J].地理科学,2009,29(6):874~879.
- [11] 谢叶伟,刘兆刚,赵军,等.基于RS与GIS的典型黑土区土地利用变化分析——以海伦市为例[J].地理科学,2010,30(3):428~434.
- [12] 张红旗,李家永,牛栋.典型红壤丘陵区土地利用空间优化配置[J].地理学报,2003,58(5):668~676.
- [13] 吴海珍,阿如早,郭田保,等.基于RS和GIS的内蒙古多伦县土地利用变化对生态服务价值的影响[J].地理科学,2011,31(1):110~116.
- [14] Yu Xingxiu, Qi Shanzhong, Xu Yuetong. Soil erosion hazard in the Yimeng mountainous region, North China[J]. Natural Hazards, 2012, 64: 1963-1967.
- [15] 刘前进,于兴修.北方土石山区土壤侵蚀强度垂直景观格局——以沂蒙山区为例[J].地理研究,2010,29(8):1471~1483.
- [16] 邱炳文,周勇,李学垣.地理信息系统支持下的区域土壤资源适宜性动态评价[J].土壤学报,2002,39(3):301~307.
- [17] 张洪叶.利用限制性评分方法确定土地农业适宜性等级——以澳大利亚新南威尔士州为例[J].地理研究,1994,13(2):67~73.

- [18] 王筱明, 闫弘文, 卞正富. 基于适宜性的济南市宜耕未利用地开发潜力评估[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 307~312.
- [19] 吴文斌. 基于遥感和GIS的土地适宜性评价研究——以

突尼斯扎戈万省为例[D]. 北京: 中国农业科学院博士论文, 2005.

## Land Use Structure Optimization Research Based on Nitrogen and Phosphorus Output Risky Control in Small Watershed

YU Xing-xiu<sup>1</sup>, LI Jian-hua<sup>1,2</sup>, LIU Qian-jin<sup>1</sup>, WU Yuan-zhi<sup>1</sup>, SUN Qi-qi<sup>1,2</sup>, GAO Yan<sup>1,2</sup>

(1. Shandong Provincial Key laboratory of Water and Soil Conservation & Environmental Protection, Institute of Water and Soil Conservation & Environmental Protection, Linyi University, Linyi, Shandong 276005, China;

2. College of Population, Resources and Environment, Shandong Normal University, Jinan, Shandong 250014, China)

**Abstract:** Taking Shuangheyu small watershed, the typical small watershed of the Yimeng mountainous area, as the object of study, the optimal allocation of land use structure in the study area was carried out based on the unit of land patches. Taking the control of the output of agricultural non-point source pollution (Nitrogen and Phosphorus, etc) into consideration, the optimal allocation of land use recognized the increase of economical and environmental benefit as the primary goal. The data was obtained using field in-situ observations district and Real-Time Kinematics (RTK) field measurement device. Land suitability evaluation was carried out through combination of the single-factor evaluation and the comprehensive evaluation method. The optimal allocation of land use structure was carried out through the method of effective coupling of linear programming model with dominant optimization analysis capabilities and GIS equipped with powerful spatial configuration function. The results showed that: the very combining of linear programming model and GIS not only provided the optimal allocation of land use with sound constraint effect in terms of area, but also matched the configuration information with specific spatial location at the same time, which enhanced the scientificity and visuality of the optimal results. As taking account of the output of N, P non-point source pollutant into the factors considered by the optimal allocation of land use, the configuration results realized the goal of unifying the economic and environmental benefits through establishing multi-objective linear programming model of minimizing output of the non-point source pollution and maximizing the economic effectiveness. The optimization scheme of the Shuangheyu small watershed increased the area of orchard and forest land by 52.3% and 820%, respectively; and reduced the proportion of the area of farmland (cultivated land) by 38.3% and wasteland by 89.3%. The total N and P annual output was reduced by 15.3% and the annual economic efficiency was improved by 41%, among which the orchard, with its overwhelmingly superior area, made the most significant contribution to the increase of economic benefits in the optimization scheme. Land suitability evaluation was conducted through combination of the single-factor evaluation and the comprehensive evaluation method, which was applied in meso and micro-scale systems and made up for the deficiency of a linear programming model. It was turned out that the method was easy to operate and had good availability of data, which guaranteed the reliability of the configuration result. The orchard, with high economic effectiveness, comparatively lower N, P output risk and good flexibility in spatial configuration, was main factor influencing the land use optimal allocation, which should be put priority in optimization scheme. This study could provide scientific evidence for the rational utilization of land resources and lay the foundation for ecological construction of the Yimeng mountainous area.

**Key words:** the Yimeng mountainous areas; output N and P; landuse; linear programming model; GIS