

武汉市中心城区水资源的优化配置

李庆航¹,付 湘²,梅亚东²,董增川¹

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098 ;
2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室,湖北 武汉 430072)

摘要 针对武汉市的水资源状况,对中心城区水资源建立面向可持续发展的区域水资源优化配置模型。采用约束法将该多目标问题转化为单目标问题,并利用复合型优化法对转化后的问题进行优选计算,从而得到一系列的非劣解。将区域内有限的水资源在各子区、各用水部门间进行最优分配,从而获得社会、经济、环境协调发展的最佳综合效益,为缓解武汉市用水供需矛盾和环境规划提供依据。

关键词 水资源优化配置 数学模型 多目标优化 约束法 复合型法

中图分类号 :TV21 30221.6 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2007)02-0069-04

Optimal allocation of water resources for urban center of Wuhan City//LI Qing-hang¹, FU Xiang², MEI Ya-dong², DONG Zeng-chuan¹ (1. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China* ; 2. *State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China*)

Abstract :Aiming at the reality of water resources of Wuhan City, a regional water resources optimal allocation model based on sustainable development was worked out for the urban center of Wuhan City. By use of the constraint method, the multi-objective problem was converted into a series of single-objective problems, and the complex optimization method was employed for optimal selection of solutions to above problems. The limited regional water resources were optimally allocated between different subareas and different departments, so that an optimum comprehensive benefit can be obtained from the harmonious development of society, economy, and environment. The result of research provides a basis for alleviating the conflict between water supply and demand and environmental planning.

Key words :optimal allocation of water resources ; numerical model ; multi-objective optimization ; constraint method ; complex method

在全国实行可持续发展、工程水利积极向资源水利转变的大环境下,面对水资源短缺、水供需矛盾突出、水生态环境恶化等严峻形势,为了解决水资源问题,实现水资源的可持续利用,以促进社会经济的可持续发展,水资源的优化配置无疑是一种合理有效的途径。多年来,国内外对水资源优化配置的研究伴随着数学规划和模拟技术的发展取得了不少成果,如从量到质,从地表水到地表水与地下水联合调度以及流域内或跨流域的水资源优化配置。通过对水资源的优化配置促进水资源的合理有效利用,促进社会、经济、环境的协调发展,促进工程水利向资源水利的转变,对其他资源的分配问题有一定的参考价值。

1 武汉市水资源基本状况

武汉市江河纵横交错,湖泊星罗棋布,境内共有大小湖泊 147 个,其中汇水面积在 0.1 km² 以上的有 104 个,水面率约 11%,主城区有湖泊 38 个,如市区的东湖、南湖等。此外,该市还拥有丰富的客水资源,长江由西南向东北横贯全市,汉江于汉口汇入长江,但是主城区沿岸废污水排放量并且集中,导致近岸水质状况一直不佳,存在岸边污染带。

全市多年平均水资源总量有 47.251 × 10⁸ m³,其中地表水资源量 43.706 × 10⁸ m³,地下水资源量 11.014 × 10⁸ m³[1],可供开发利用量相当可观。武汉市水资源的优化配置对实现水资源的可持续利用,协调社会、环境、经济的可持续发展具有重要意义。

基金项目 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放基金资助项目(2003400119)
作者简介 李庆航(1982—),男,山东郓城人,博士研究生,从事水资源规划与管理研究。E-mail :chris0927@163.com

2 模型的建立

武汉市城市面积较大,水网庞大,供水系统是一个多目标、多用途的复杂水资源大系统,在建立模型之前需要对子区、水源和用户进行划分。

a. 子区的划分。考虑到该地区的地形、地貌和行政区划,将武汉市中心城区划分为 3 个子区:武昌片,汉口片,汉阳片。

b. 水源的划分。根据各区的情况,为尽量减少水资源的重复量,将水源划分为 4 个部分:水利工程供水源,自备水源,公共水源,地下水源。

c. 用户组成。用户组成即武汉市供水系统的对象,包括 5 个方面:生活用水,农村畜牧用水,工业用水,农田灌溉用水,林牧渔用水。

2.1 目标函数

考虑武汉市社会、环境与经济协调发展,模型目标选择经济效益、社会效益、环境效益 3 者的综合效益最佳^[2],具体分别以区域供水净效益最大、区域总缺水量最小、区域重要污染物(COD)排放量最小来表示。

a. 目标 1(经济效益),以区域供水净效益最大来表示:

$$\max f_1(x) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} \sum_{i=1}^{I(k)} (b_{ijk} - c_{ijk}) x_{ijk} \alpha_{ik} \beta_{jk} w_k \quad (1)$$

($i = 1, 2, \dots, I(k)$; $j = 1, 2, \dots, J(k)$; $k = 1, 2, \dots, K$)

式中: b_{ijk} 为 k 子区 i 水源对 j 用户的效益系数,元/ m^3 ; c_{ijk} 为 k 子区 i 水源对 j 用户的费用系数,元/ m^3 ; x_{ijk} 为 k 子区 i 水源对 j 用户的供水量,万 m^3 ; α_{ik} 为各水源供水次序系数; β_{jk} 为各用户的用水公平系数; w_k 为 k 子区权重系数。 $I(k)$, $J(k)$ 分别为 k 子区的水源及用户数。

b. 目标 2(社会效益),以区域总缺水量最小来表示:

$$\min f_2(x) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} \left(D_{jk} - \sum_{i=1}^{I(k)} x_{ijk} \right) \quad (2)$$

式中: D_{jk} 为 k 子区 j 用户的需水量,万 m^3 ;其他符号意义同前。

c. 目标 3(环境效益),以重要污染物(COD)的排放量最小来表示:

$$\min f_3(x) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} 0.01 d_{jk} p_{jk} \sum_{i=1}^{I(k)} x_{ijk} \quad (3)$$

式中: d_{jk} 为 k 子区 j 用户单位废水排放量中重要污染因子(COD)的质量浓度,mg/L; p_{jk} 为 k 子区 j 用户的污水排放系数。

2.2 约束条件

模型的约束条件有优化配置过程中计算要求的约束,还有经济、社会、资源供给量、生态环境之间协调的约束,主要考虑水源可供水量、供水上限、用户需求、区域协调发展等^[3-4]。

a. 水源的可供水量约束,即 k 子区 i 水源向所有用户的供水量之和应小于其可供水量:

$$\sum_{j=1}^{J(k)} x_{ijk} \leq W_{ik} \quad (4)$$

式中: W_{ik} 为 k 子区 i 水源的可供水量。

b. 供水上限约束:

$$x_{ijk} \leq Q_{ijk} \quad (5)$$

其中

$$Q_{ijk} = \min \{W_{ik}, D_{jk}\}$$

约束条件 a 是对 k 子区 i 水源的供水总量的约束,对于‘单一’供水量,即 i 水源供给任一个用户的水量 x_{ijk} 也必须满足:既不能超过水源 i 的可供水量 W_{ik} ,也不能超过用户实际所需的水量 D_{jk} 。

c. 用户需水量约束,即 j 用户从所有水源获得的水量应该介于该用户需水量上、下限之间:

$$\text{上限} \quad \sum_{i=1}^{I(k)} x_{ijk} \leq H_{jk} \quad (6)$$

$$\text{下限} \quad \sum_{i=1}^{I(k)} x_{ijk} \geq L_{jk} \quad (7)$$

式中: H_{jk} 和 L_{jk} 分别为 j 用户需水量的上、下限。

d. 区域协调发展约束。区域协调发展包括水资源利用与经济发展、经济发展与环境改善两方面。协调程度是一个模糊概念,这里用模糊数学中的隶属函数表示这两方面的协调度。区域的 σ_1 和 σ_2 分别取各相应子区比值的加权平均。

$$\mu = \sqrt{\mu_{B_1}(\sigma_1) \mu_{B_2}(\sigma_2)} \geq \mu^* \quad (8)$$

$$\sigma_{1k} = \frac{\sum_{j=1}^{J(k)} \left(\sum_{i=1}^{I(k)} x_{ijk} + \sum_{c=1}^M x_{cjk} \right)}{\sum_{j=1}^{J(k)} D_{jk}} \quad (9)$$

$$\sigma_1 = \sum_{k=1}^K w_k \sigma_{1k} \quad (10)$$

$$\mu_{B_1}(\sigma_1) = \begin{cases} 1.0 & \sigma_1 \geq \sigma_1^* \\ \exp(-4(\sigma_1 - \sigma_1^*)^2) & \sigma_1 < \sigma_1^* \end{cases} \quad (11)$$

$$\sigma_{2k} = \frac{E_k/E_{0k}}{f_k/f_{0k}} \quad (12)$$

$$\sigma_2 = \sum_{k=1}^K w_k \sigma_{2k} \quad (13)$$

$$\mu_{B_2}(\sigma_2) = \exp(-4(\sigma_2 - \sigma_2^*)^2) \quad (14)$$

式中: μ^* 为区域协调发展指数,假定其最低值为 0.8; σ_{1k} 和 σ_1 分别为 k 子区以及整个区域的水资源利用与经济发展的比值(供需水量比值); σ_{2k} 和 σ_2

分别为 k 子区及整个区域经济发展与环境改善程度的比值; B_1 为水资源利用与经济发展相协调的模糊子集; B_2 为经济发展与环境改善相协调的模糊子集; $\mu_{B_1}(\sigma_1)$ 和 $\mu_{B_2}(\sigma_2)$ 为隶属函数,前者表示资源利用与经济发展的协调度,后者表示区域经济发展与环境改善之间的协调度; σ_1^* 为区域水资源利用与经济发展的最佳比值,视具体情况确定,本文取 1.0; σ_2^* 为区域经济发展与环境改善程度的最佳比值,这里取 1.0; E_{0k} 和 E_k 分别为基准年和规划水平年 k 子区的经济学指标(人均 DP、人均纯收入等); f_{0k} 和 f_k 分别为基准年和规划水平年 k 子区的重要污染物排放量。

e. 变量非负约束:

$$x_{ijk} \geq 0 \quad (15)$$

由上面的目标函数和约束条件组合在一起就构成了水资源优化配置模型。该模型是一个十分复杂的多目标、多水源、多用户的优化模型,其具有以下特点:①多目标。模型中设置了社会、经济、环境三方面综合效益最大的 3 个目标,经济目标(经济效益)是求极大值,环境(污染物排放量)和社会目标(缺水量)是求极小值。各目标之间的权益相互矛盾、相互竞争。②大系统多关联。模型中存在多子区、多水源、多用户、多维决策变量,不仅模型规模比较大,而且多关联、多约束。③非线性。譬如模型中的协调发展约束为非线性。

2.3 模型参数的确定

2.3.1 用户公平系数和水源供水次序系数

依照公平性原则,在经济目标中考虑用户公平系数 β_{ik} ,反映某用户相对于其他用户优先得到供水的重要程度^[5]。按照‘先生活、后生产’的原则,武汉市中心城区水源分配要在优先满足人民生活饮用水的前提下,统筹安排工农业生产和其他用水。各水源供水次序系数 α_{ik} 采用类似方法确定。

2.3.2 需水量及其上、下限

k 子区 j 用户的需水量上、下限 H_{jk} 和 L_{jk} ($k = 1, 2, 3$; $j = 1, 2, \dots, 5$) 包括以下 4 个方面:①生活需水量上、下限;②工业需水量上、下限;③农田灌溉需水量上、下限;④林牧渔业需水量上、下限。

2.3.3 权重系数

子区权重:武昌片 0.35, 汉口片 0.4, 汉阳片 0.25。

2.3.4 其他参数

模型中的其他参数,如单位供水量的效益系数和费用系数^[6]、区域协调发展指数以及重要污染因子的含量、污染排放系数等,结合具体情况确定。

3 模型求解

多目标问题求解的方法很多,基本思想就是将其转化为单目标问题。比如约束法、分层序列法、功效系数法、评价函数法等。分层序列法的思想是把多个目标按重要程度排序,先求出第 1 个目标的最优解,再在达到此目标的条件下求出第 2 个目标的最优解,依此类推,直到最后一个求解结束即得到最优解。该方法的缺点是如果前面的问题最优解唯一时后面的求解即失去意义。功效系数法对不同类型的目标函数统一量纲,分别得到一个功效的系数函数,然后求解所有功效系数乘积的最优解。该方法的缺点在于量纲难以统一,3 个目标的统一具有一定困难且系数的确定有很大的主观性。这里采用约束法对该问题进行求解,能比较全面地求解问题的非劣解,只是计算量比较大。

3.1 约束法的求解思想

用约束法求解该多目标问题的求解思想^[7-8]是:通过求解约束问题生成非劣解。该方法能生成全部的非劣解 X^* ,在理论上对非凸性和凸性问题都能适用。

在多个目标中,选择其中的 1 个目标(如经济指标)作为基本目标,而将其余的目标转化为不等式约束,这是约束问题的普遍形式,记为 $P_k(\varepsilon)$,于是有

$$\begin{cases} \min f_k(x) \\ \text{s.t. } x \in X \\ f_i(x) \leq \varepsilon_i \end{cases} \quad (16)$$

式中 ε_i 为第 i 个目标的上限值, $i = 1, 2, \dots, p$, 且 $i \neq k$ 。

设 ε_0 为一向量,且对问题 $P_k(\varepsilon_0)$ 是可行的。若 x_0 是 $P_k(\varepsilon_0)$ ($1 \leq k \leq p$) 的唯一解,或每个 k ($k = 1, 2, \dots, p$), 解 $P_k(\varepsilon_0)$, 则 x_0 即为向量优化问题的一个非劣解。这就意味着向量优化问题至少有某些非劣解能通过求解 $P_k(\varepsilon)$ 得出,只要 ε 的选取对 $P_k(\varepsilon_0)$ 是可行的。

由于这种方法须将各个目标依次选为基本目标,并不断变化约束值 ε_i , 因此又称这种方法为摄动约束法。

3.2 复合型法的求解思想

复合型法的思想来源于线性规划的单纯形法,相当于在可行域内使用单纯形法。该方法主要是求最小值问题。它在多维空间中构成多面体即复合形,计算各顶点所对应的函数值,并逐一进行比较,再利用一定的手段找出函数值有所改善的点,以取代最劣点,如此反复,直到满足要求为止^[9-10]。

3.3 求解步骤及结果

求解步骤分为 4 步：

a. 求解该模型中各个目标的极值,寻求各目标的最优解,建立决策变量与目标函数值的对应表。行为决策变量,列为目标函数。找出第 k 列的最大值 M_k 和最小值 n_k ($k = 1, 2, \cdots, p$)。

b. 将多目标问题转化为约束问题。

c. 在找到的 n_k 和 M_k 中,表示出目标 k 在非劣集的变化范围,即 $n_k \leq f_k \leq M_k$,这个范围就是 ε 的变化范围。然后选择 ε_k 值的数目,以便生成非劣解。这里将 ε_k 不同值的数目记为 r 。

d. 对 ε_k 值的每种组合 ($k = 1, 2, \cdots, k - 1, k + 1, \cdots, p$) 求解约束问题,其中

$$\varepsilon_k = n_k + \frac{t}{r - 1} (M_k - n_k) \quad (t = 0, 1, 2, \cdots, r - 1)$$

这里 ε_k 值的组合数有 r^{p-1} 个。若 r^{p-1} 数目的约束问题是可行的,每个均可产生一个非劣解(且目标约束是有制约力的),那么这些解均是非劣解集中有希望的近似解。

对转化成的单目标进行优化求解,计算结果如表 1 所示。

表 1 在不同非劣解情况下各目标的函数值

决策变量	经济目标 $f_1(X)$ /亿元	社会目标 $f_2(X)$ /亿 m^3	环境目标 $f_3(X)$ /万 t
X_1	175.0202	1.0934	58.1108
X_2	172.5624	1.1821	57.7613
X_3	171.2790	1.4891	56.1957
X_4	173.6085	1.1246	57.9675
X_5	174.0369	1.1095	58.0254
X_6	173.9360	1.1146	58.0074
X_7	174.4047	1.1270	57.9908
X_8	173.0703	1.1490	57.8653
X_9	173.3607	1.1562	57.8256
X_{10}	174.3569	1.1271	57.9929
X_{11}	175.1928	1.0043	58.0982
X_{12}	174.9609	1.1131	58.0531

注 经济目标即经济效益最大,社会目标即缺水最小,环境目标即污染物排放量最小。

将所求得的非劣解进行处理,分别取其平均值,并将各组中各个数值除以平均数得到 3 组相对平均值,观察其变化趋势,对结果进行对比分析(图 1)。

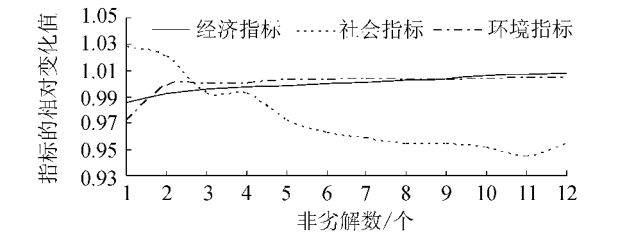


图 1 经济、社会、环境指标的相对变化情况

分析表 1 和图 1 可以看出:随着经济效益的增加,相应的剩余水量逐渐减少,污染物浓度的变化在相应地增加。现状水平年没有出现缺水情况。将经济效益和环境指标进行分析比较,可以得出优选配置方案之一如表 2、表 3 所示。

表 2 各区域各用户的配水量 亿 m^3

区 域	生活用水	农村畜牧用水	工业用水	农田灌溉用水	林牧渔用水
武昌片	2.3387	0	7.2634	0.5703	0.1773
汉口片	2.2305	0	1.5924	0	0
汉阳片	0.4507	0	0.6206	0	0

表 3 各区域各水源的供水能力 亿 m^3

区 域	水利工程	自备水源	公共水源	地下水源
武昌片	0.7906	5.8264	3.6511	0.0815
汉口片	0.0586	0.1181	3.6110	0.0352
汉阳片	0.0718	0.1739	0.8048	0.0208

在该情况下,可以得到相应的 3 个指标的值:区域最大经济效益为 174.3569 亿元,总的剩余水量为 1.1271 亿 m^3 ,环境指标中 COD 的排放量为 57.9929 万 t/a。根据水资源可持续发展战略,区域的社会经济发展应该是在资源和环境所允许的范围之内,其发展速度和规模应该和水资源的承载能力相适应。在上述方案情况下,区域协调发展指数为 0.92(最小的协调发展指数为 0.8),说明该情况下的协调性较好。

由上述结果可知,在现状水平年的情况下武汉市的供水能力相对需水有一定的超前。对于武汉市这样水资源比较丰富的城市,供水作为重要基础设施具有一定超前性是合理的。另外,年供水量根据设计的最大日供水能力换算而来,考虑了高峰供水,反映在优化配置中有一定余水,也是合理的。

4 结 语

本文结合武汉市实际情况,研究了多水源多用户的水资源系统的优化问题,建立了以社会、经济、环境为目标函数的多目标优化模型。模型求解的综合优化配置的作用在于 ①把各区各水源的配水情况与供水能力相比较,用户所得到的水量与所需水量进行比较,通过优化配置可以解决各部门用水需求的矛盾,缓解城市水资源不足。②得到区域规划水平年的重要污染物排放量,从而可与环境保护规划中所提出的污染物排放控制目标进行对比分析,为环境保护提供决策依据。③通过供需水平分析,结合区域的具体情况,提出解决区域供需水量矛盾的途径与措施。因此水资源优化配置能保证社会、经济、环境的协调发展,有利于区域的可持续发展,是解决城市用水紧张问题的有效途径之一。(下转第 84 页)

水户节水意识。⑤建立健全用水定额修订机制,建立健全用水统计制度,考核用水水平和效率,追踪用水定额的变化规律。

致谢 本文得到李作洪总工程师和云南农业大学熊耀湘、李靖两位教授的帮助指导,特此致谢。

参考文献：

[1] 《新编云南省情》编委会. 新编云南省情[M]. 昆明: 云南人民出版社, 1996 3-12.
[2] 李荣梦, 李作洪, 何春培. 云南水资源及其开发利用[M]. 昆明: 云南人民出版社, 1981 9-37.
[3] 云南省土地管理局, 云南省土地利用现状调查领导小组办公室. 云南省土地资源[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2000 33-40.
[4] 云南省土壤肥料工作站, 云南省土壤普查办公室. 云南土壤[M]. 昆明: 云南科技出版社, 1996 101-121.
[5] 云南省农牧渔业厅. 云南省种植业区划[M]. 昆明: 云南

科技出版社, 1992 123-184.
[6] 云南省水利厅. 2003 年云南省水资源公报[R]. 昆明: 云南省水利厅, 2004 13-25.
[7] 顾世祥, 傅骅, 李靖. 云南省农业灌溉现状及对策研究[J]. 中国农村水利水电, 2001(3) 9-12.
[8] 云南省统计局. 2003 年云南省统计年鉴[R]. 北京: 中国统计出版社, 2004 723-726.
[9] 顾世祥, 傅骅, 高嵩, 等. 低纬度高原区农业灌溉需水规律研究[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(4) 71-74.
[10] 段兴林, 顾世祥, 浦承松, 等. 滇中高原区农业灌溉研究[J]. 节水灌溉, 2005(5) 42-44.
[11] 邱苑梅, 段美英, 付学芬. 云南省灌溉用水定额编制中的几个关键技术问题[J]. 节水灌溉, 2004(5) 40-41.
[12] 王龙, 李靖. 云南省水稻灌溉用水定额等值线图研究[J]. 节水灌溉, 2006(1) 28-30.
[13] 云南省农业厅. 云南再生稻[M]. 昆明: 云南科技出版社, 1997 24-78. (收稿日期 2005-03-13 编辑 熊水斌)

(上接第 72 页)

参考文献：

[1] 武汉市水务局. 武汉市水资源规划[R]. 武汉: 武汉市水务局, 2001 5-13.
[2] 王浩, 秦大庸, 王建华. 黄淮海流域水资源合理配置[M]. 北京: 科学出版社, 2003 7-31.
[3] 姜涛. 对区域水资源优化配置多目标规划的模型[J]. 黑龙江水利科技, 2004(2) 95.
[4] 翁文斌, 蔡喜明, 史慧斌, 等. 宏观经济水资源规划多目标决策分析方法研究与应用[J]. 水利学报, 1995(2) 1-11.
[5] 吴险峰, 王丽萍. 枣庄城市复杂多水源供水优化配置模

型[J]. 武汉水利电力大学学报, 2000, 33(1) 30-32.
[6] 赵丹, 邵东国, 刘丙军. 西北灌区水资源优化配置模型研究[J]. 水利水电科技进展, 2004, 24(4) 5-7.
[7] 袁宏源, 邵东国, 郭宗楼. 水资源系统分析理论与应用[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 2000 218-232.
[8] 冯尚友. 多目标决策理论与应用[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990 81-82.
[9] 陈宝林. 最优化理论与算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002 57-69.
[10] 徐士良. C 语言程序设计集[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 1994 261-265. (收稿日期 2005-11-22 编辑 高建群)

(上接第 79 页)

“前埂后沟+梯壁植草”方式的水平梯田与梯壁不植草的对照水平梯田相比, 其减少土壤流失量达 98.2%; 从柑橘产量来看, 外斜式梯田的第 15 小区与标准式梯田的第 12 小区相比, 其产量提高 45%。所以在修筑土坎梯田的区域, 要更加注重植物措施的水土保持作用, 大力推广梯壁植草, 既能有效地保护梯壁, 又能起到良好的水土保持效果。

b. 不同类型梯田水土流失量的减与增和柑橘产量的高与低不完全一致, 这表明作物产量不仅与水土流失量有关, 而且与土壤水分含量和土壤肥力密切相关。百喜草虽然有很好的蓄水保土效应, 但其根系发达, 能大量吸收临近柑橘区的养分, 对柑橘产量有一定的影响。由于未对径流和泥沙中养分含量进行观测, 其影响程度尚待进一步研究。

参考文献：

[1] 贺湘逸. 红壤坡地利用中的水分问题[C]//杨言生, 信詮. 中国红黄壤地区农业综合发展与对策. 北京: 中国农业科技出版社, 1995 107-111.
[2] 谢开云. 中国南方红壤区种草养畜的潜力及问题[C]//

张马祥. 中国红壤与牧草. 北京: 中国农业科技出版社, 1993 19-26.
[3] 赵其国, 何园球, 张桃林. 红壤低丘岗地的优化农业生态模式[C]//王明珠, 张桃林, 何园球. 红壤生态系统研究. 南昌: 江西科学技术出版社, 1993 88-91.
[4] 陈斌飞, 陈鸿昭, 曹锦铎. 红壤土地资源持续利用与管理的研究方法[C]//王明珠, 张桃林, 何园球. 红壤生态系统研究. 南昌: 江西科学技术出版社, 1993 27-32.
[5] ZUO Chang-qing, ZHANG Xian-ming, WU Chia-chun. Preliminary report on technical for soil and water conservation, flood control and natural disaster reduction on red-soil hilly and sloping lands [C]//Proceedings of 12th International Soil Conservation Organization Conference (Volume 1). Beijing: Tsinghua University Press, 2002 160-165.
[6] 左长清, 胡根华, 张华明. 红壤坡地水土流失规律研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(6) 89-91.
[7] 胡建民, 胡欣, 左长清. 红壤坡地坡改梯水土保持效应分析[J]. 水土保持研究, 2005, 12(4) 271-273.
[8] 徐明岗, 文石林, 高菊生. 红壤丘陵区不同种草模式的水土保持效果与生态环境效应[J]. 水土保持学报, 2001, 15(1) 77-80.
[9] 陈旭晖, 周长华, 周丕东. 贵州山区水土保持实验研究[J]. 贵州农业科学, 1994(1) 3-8. (收稿日期 2005-09-30 编辑 冯敏峰)