

基于 GIS 的区域雨水资源化潜力评价模型研究

赵西宁, 吴普特^{*}, 冯 浩, 王万忠

(中国科学院水利部水土保持研究所 国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心, 杨凌 712100)

摘 要: 区域雨水资源化潜力的定量评价对于雨水资源开发利用的宏观决策、规划设计具有十分重要的意义。该文以黄土高原地区为例, 系统分析了影响区域雨水资源化潜力的各个因子, 确定定量评价区域雨水资源化潜力的各项指标, 并运用 GIS 技术, 集成多种来源、多种比例尺和多种类型的数据, 建立区域雨水资源化潜力定量评价模型。评价模型对于黄土高原地区雨水资源可持续利用及生态与环境保护具有重要作用。

关键词: 黄土高原; 雨水资源化潜力; GIS; 评价模型

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2007)2-0006-05

赵西宁, 吴普特, 冯 浩, 等. 基于 GIS 的区域雨水资源化潜力评价模型研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 6-10.

Zhao Xining, Wu Pute, Feng Hao, et al. Regional rainwater harvesting potential assessment model based on GIS[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2): 6-10. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

雨水资源利用作为一项传统、实用, 并亟待开发的非常规水资源高效利用技术, 伴随着干旱缺水危机态势的加剧, 已受到人们高度关注与重视。20 世纪 80 年代以来, 黄土高原雨水资源开发利用发展迅猛, 其中以甘肃的“121 雨水集流”工程、陕西的“甘露”工程、宁夏南部的“窑窖农业”最具代表性和典型性^[1]。实践证明, 雨水利用不仅是解决干旱缺水的临时权益之计, 而且也是一种可持续的综合发展模式 and 战略性措施^[2]。更重要的是, 它引发了人们对传统水资源概念及其理论的重新认识, 认识到雨水资源总量才是水资源总量, 地表水与地下水由其转化而来, 属于雨水派生的资源^[3,4]。基于此概念, 对水资源进行评价, 得到不同的水资源数量。为了保证雨水资源能够持续利用, 必须对雨水资源可开发利用潜力做出合理评价, 使雨水资源能在整体上发挥最大的

经济效益、生态效益和社会效益。目前, 对于雨水资源可开发利用潜力的研究主要集中在坡面和小流域尺度上, 缺乏从区域尺度上对雨水资源可开发潜力进行系统性分析^[5-7]。坡面、小流域等小尺度上的评价指标体系及其评价方法也难以适合区域尺度上的评价, 因而亟需探讨区域尺度上的雨水资源开发潜力评价指标体系和评价方法。针对此问题, 本文以黄土高原为例, 以雨水资源为对象, 在对区域不同雨水资源化潜力阐述基础上, 分析该区雨水资源化潜力的影响因子特征, 确定雨水资源化潜力评价的各项指标, 并利用 GIS 技术, 建立了区域雨水资源化潜力定量评价数学模型, 为实现雨水资源持续高效利用及保证生态与环境健康发展奠定基础。

1 区域雨水资源化潜力

雨水自空中降落到地球表面以后, 经过下垫面再分配, 转化为地表水、土壤水和地下水, 才能成为可以利用的资源。雨水、地表水、土壤水和地下水相互转化, 共同构成复杂的雨水资源化系统(图 1)。在雨水转化过程中, 不可避免涉及到雨水资源量的损失, 主要包括河川径流损失 ΔR 和总蒸发损失 ΔE 。从图 1 可看出, 雨水资源量的损失包括植物截留损失 ΔE_z 、地表蒸发损失 ΔE_d 、包气带蒸发损失 ΔE_t 、潜水蒸发损失 ΔE_g 、坡面径流损失 ΔR_d 、壤中流损失 ΔR_l 、河川基流损失 ΔR_g 和地下水潜流量损失 ΔU_g 8 个方面, 可表示为

$$\Delta P = \Delta E_z + \Delta E_d + \Delta E_t + \Delta E_g + \Delta R_d + \Delta R_l + \Delta R_g + \Delta U_g \quad (1)$$

式中 ΔP ——雨水资源化系统转化过程中的雨水资源损失量。

收稿日期: 2006-02-16 修订日期: 2006-09-01

基金项目: 国家科技基础性工作专项(2006FY210300); 国家 863 计划项目(2006AA100217, 2006AA100204); 国家科技支撑计划(2006BAD09B01); 陕西省自然科学基金项目(2006D15); 中国科学院水利部水土保持研究所领域前沿项目(SW05503); 西北农林科技大学科研专项资助

作者简介: 赵西宁(1976-), 男, 陕西渭南人, 博士, 主要从事水土保持资源高效利用及其效益评价方面的研究。杨凌 中国科学院水利部水土保持研究所 国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心, 712100。

Email: zxsnsb@yahoo.com.cn

^{*}通讯作者: 吴普特(1963-), 男, 陕西武功人, 博士, 博士生导师, 主要从事水土保持与节水农业方面的研究。杨凌 中国科学院水利部水土保持研究所 国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心, 712100。

Email: Gjzwpt@vip.sina.com

雨水资源化是指雨水被开发、利用, 转化为资源并产生其价值的一个过程。雨水资源化潜力可定义为, 特定区域在一定时段和科学技术水平条件下, 以雨水资源开发利用不引起生态与环境退化为前提, 可以开发利用的潜在雨水资源量, 即雨水转化为雨水资源的最大能力。根据研究目的和层次不同以及对雨水资源化复杂巨系统转化过程的分析, 可以建立雨水资源化理论潜力和可实现潜力概念。

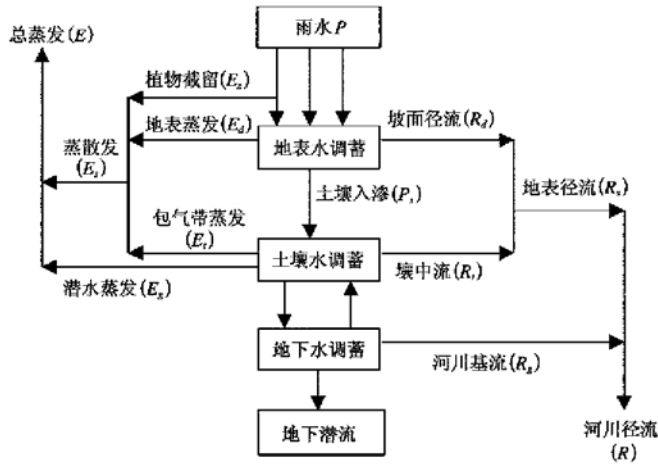


图 1 雨水、地表水、土壤水和地下水转化概念图

Fig. 1 Conceptual framework of transformation of rainwater, surface water, soil water and underground water

由图 1 可以看出, 雨水资源化理论潜力应是区域的雨水资源损失量 ΔP 为零, 即为该区域的天然水资源补给量——区域雨水资源总量, 其计算方法为

$$W_i' = P_i \quad (2)$$

式中 W_i' ——时段 t 内区域雨水资源化理论潜力;
 P_i ——时段 t 内区域降雨量。

W_i' 是区域雨水资源化理论潜力的极限值, 实际上, 受自然经济条件和科学技术水平等因素限制, 人们仅能开发利用部分雨水资源, 可以无限接近雨水资源化理论潜力, 但不可能达到理论潜力值。由式(1)可知, 雨水资源化潜力主要受植被截留损失、地表蒸发损失等 8 个方面的因素影响。关于植被截留和地表蒸发方面的计算方法虽然较多, 但对于区域范围的研究, 由于缺乏原始资料积累, 从潜力可实现角度分析, 可不予考虑。同时, 黄土高原为典型的超渗产流, 地下水位埋藏较深, 包气带平均厚度多在 50 m 以下, 且难以开采利用, 因而在雨水资源化潜力研究时, 可将涉及包气带蒸发损失、潜水蒸发损失、壤中流损失、河川基流损失和地下水潜流量损失等地下水方面的雨水资源量转化忽略不计^[8,9]。由此可提出雨水资源化可实现潜力, 即主要集中在坡面径流 R_d 和土壤入渗 P_s 两个方面, 计算方法为

$$W_i'' = R_d + P_s \quad (3)$$

式中 W_i'' ——时段 t 内雨水资源化可实现潜力;
 R_d ——时段 t 内坡面径流量; P_s ——时段 t 内土壤入渗量。

关于黄土高原土壤入渗量的研究成果较多, 但由于入渗测定方法不同(如双环法、人工降雨法等), 导致所得土壤入渗结果差异较大, 其资料难以参考利用, 且目前对于黄土高原雨水资源开发利用的一系列研究, 主要集中在拦截坡面径流 R_d 方面。基于上述分析, 本文对可实现潜力研究主要集中在拦截坡面径流 R_d 方面。

2 模型基本思想

区域雨水资源化潜力的实现一般是利用宏观分区或网格化的方法, 将一个大区域划分为若干个适于区域评价的小单元, 并认为评价单元内各影响因素一致。基本评价单元的划分有一个尺度上的概念, 尽管一个大区域被划分为若干个小的单元, 但实际上, 各单元仍然被控制在某一尺度上的“小区域”, 反映区域信息, 并服从于区域整体评价的需要^[10]。通过分析区域内雨水资源化潜力的各个影响因子, 确定各项数理指标, 并利用 GIS 等技术, 集成多种来源、多种尺度以及多种类型的数据, 建立空间数据库, 按照模型参数要求提取各项相关的专题信息, 运用统计分析法, 分析潜力与各个影响因子的关系, 进而建立以雨水资源化可实现潜力为因变量, 以各影响因子的评价指标为自变量的评价模型。

根据上述分析, 本文所建立的评价模型, 实际上是以区域雨水资源化可实现潜力为因变量, 以各影响因素为自变量的统计回归模型。降雨是雨水资源开发利用的对象, 降雨因子所蕴涵的物理意义即可反映这一过程, 并在土壤、植被、地形地貌和人为因素等辅助因子作用下, 产生现实的雨水资源化潜力。根据以上思路, 借助概率论基本原理, 影响区域雨水资源化潜力的气候因素、土壤因素、地形地貌因素、植被因素与人为因素之间的关系是一个典型乘法事件。则有

$$W_i'' = \alpha \times P \times S \times T \times Z \times H \quad (4)$$

式中 W_i'' ——雨水资源化可实现潜力; P ——气候因素; S ——土壤因素; T ——地形地貌因素; Z ——植被因素; H ——人为因素; α ——系数。

3 模型参数分析

3.1 黄土高原雨水资源化潜力影响因子分析

降雨是影响雨水资源化潜力的最基本因素, 是雨水开发利用的必要条件。降雨特性(降雨量、降雨历时、降雨强度、降雨过程、降雨面积、暴雨中心移动方向)对雨水资源化潜力起重要作用。黄土高原降雨主要集中在汛

期(5~9月),且多为高强度暴雨^[11]。土壤主要通过影响降雨入渗速率来间接影响雨水资源开发利用,由于黄土高原土壤类型、质地、结构、肥力、利用方式的不同,导致土壤入渗速率的水平变化具有明显的地域差异^[12]。坡度、坡长、分水岭与谷底及河面的相对高差等都对雨水资源化潜力具有很大的影响。在地形地貌因子中,坡度对雨水资源化潜力影响最大。坡度直接影响径流汇流,坡度越大,汇流时间越短,径流能量越大,导致径流损失越大。在坡面和小流域层次上,对地形地貌条件的考虑可最终归结到坡面上;而对区域尺度的研究,显然不可能顾及到某一具体坡面上,通常是根据区域内部的大地貌类型分异情况来宏观区分,如将丘陵和塬面等分别作为一个评价类型,或是选用一个能够反映一定区域范围内宏观地形状况的综合度量指标进行评价^[13]。植被因素对区域雨水资源化潜力具有积极的作用,良好的植被覆盖度可以显著减缓坡面径流损失。人类活动对区域雨水资源化潜力的影响主要是通过雨水利用工程措施、生物措施和耕作措施对水循环过程产生影响,以改变水量平衡要素,改变蒸发与径流的比例,改变地表径流与雨水入渗到土壤中的比例以及径流在时间与空间上的分布等^[14]。

3.2 模型参数确定

利用模型定量评价区域雨水资源化潜力分布状况,要求所选取的评价参数应具备以下特点:宏观性,即指标能反映区域影响因子的宏观特征;计算方便性,即评价指标具有数量化的概念,以适应定量评价的要求;易于获取,使评价易于实现,缩短周期;适于GIS处理,即指标均可直接或间接地由地理空间数据获得,同时适应于特定的GIS工具软件。按照对评价指标的要求,同时参考前人相关研究结果^[15],经过反复比较和筛选,最后确定适于黄土高原雨水资源化潜力评价的各项指标(表1)。

表1 区域雨水资源化潜力评价模型参数

Table 1 Parameters of regional rainwater harvesting potential assessment model

影响因素	气候	土壤	植被	地形	人为因素
评价指标量纲	汛期降雨量 (5~9月) /mm	> 0.25 mm 水 稳性团粒含量 /%	植被盖度 /%	沟壑密度 /km·km ⁻²	治理度 /%

4 区域雨水资源化潜力评价模型

4.1 模型形式

式(4)仅反映了雨水资源化可实现潜力与其影响因子之间的一种框架关系,远不是实际意义上可以操作的模型。式中各参数所对应的影响因素均有着相对独立的

内在规律和机理,而这些参数又分别是由一系列亚参数来确定的。在本文中,区域雨水资源化潜力各个因素分别被归结到某一具体数量指标上(表1)。根据现有研究成果,借助相关分析及曲线拟合的原理,分别确定区域雨水资源化可实现潜力与汛期降雨量、沟壑密度、土壤水稳性团粒含量均呈幂函数相关;植被盖度、治理度与其呈指数函数相关。模型的数学表达式为

$$W_i^r = \alpha \times P^p \times S^s \times T^t \times e^{zZ} \times e^{hH} \quad (5)$$

式中 W_i^r ——区域雨水资源化可实现潜力,mm;
 P ——汛期降雨量,mm;
 S ——> 0.25 mm 土壤水稳性团粒含量,%;
 T ——沟壑密度,km/km²;
 Z ——植被盖度,%;
 H ——治理度,%;
 小写字母均为待定系数。

4.2 建模数据的GIS集成与提取

根据评价参数数据处理的需要,评价模型涉及的源数据主要包括:研究区边界图(1:50万黄土高原及其比邻地区图,地图出版社,1991)、多年降雨原始数据、沟壑密度分布数据、土壤类型分布图(1:100万,地图出版社,1988)及其土壤团粒含量数据(《中国土壤》、《陕西土种志》等)、黄土高原植被数据和治理度数据以及原始径流数据^[16-18]。这些数据具有典型的多类型、多比例尺和形态多样的特点,必须进行GIS空间集成,使其统一到雨水资源化潜力评价对数据要求的整体框架内。利用ArcGIS分别数字化研究区域边界图和土壤图;用图形分析软件Surfer处理汛期降雨、沟壑密度以及径流数据,生成相应的等值线图,再建立起Surfer与ArcGIS之间的数据交换接口,使Surfer图文数据转换为相应的ArcGIS矢量数据;最后经投影变换,将各项模型参数所需数据集成为一个规范的GIS空间数据库(数据格式和投影关系均一致)。

基于GIS的区域雨水资源化潜力评价思想,将携带各项影响因子信息的空间数据依次与研究区边界图进行空间叠加(Overlay)。在叠加结果图的属性库中,以多边形的编号来统计各专题信息的参数值。在GIS属性库中,对多边形而言,每一个多边形便具有包括降雨、径流、土壤、地形、植被以及人为影响等在内的全部雨水资源化潜力信息。经过上述分析处理,就可以将各建模参数数据进行汇总,形成一个以多边形单元数量为记录总数,以各建模参数为记录字段,一个多边形对应6个字段的数据文件,它实际上构成了一个包括各项模型参数在内的数据矩阵。

4.3 模型确定

根据上述分析,模型基本形式为: $W_i^r = \alpha \times P^p \times S^s \times T^t \times e^{zZ} \times e^{hH}$ 。按照线性回归分析的需要,须对上述数学表达式进行适当变形,以方便数据分析。对式(5)

两边同时取对数, 则有

$$\ln W_i = p \ln P + s \ln S + t \ln T + z Z + h H + \lambda \quad (6)$$

可以简化为

$$y = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + a_5 x_5 + \lambda \quad (7)$$

在数据集成的结果数据库中, 各项数据均表现为建模参数的原始值, 因而必须进行适当的处理, 主要包括: 剔除汛期降雨量、土壤团粒含量、沟壑密度、植被覆盖度、治理度为零的记录; 对剔除后的数据分别取对数, 最后获取分析用的数据库文件。在 SPSS 中, 用数据分析功能对上述数据进行回归分析, 建立区域雨水资源化可实现潜力定量评价数学模型。具体评价模型如下

$$W_i = 1.4382P^{0.8748} \times S^{-0.0862} \times T^{0.2183} \times e^{-0.0235Z} \times e^{-0.2271H} \quad (8)$$

复相关系数 $r = 0.9137$, $F = 974 \gg F_{0.01} = 2.25$, 相关性显著。

由模型(8)可以看出, 可实现潜力与多年平均汛期降雨量、沟壑密度呈正相关函数关系; 与 $> 0.25 \text{ mm}$ 土壤水稳性团粒含量、植被盖度、治理度呈负相关函数关系。多年平均汛期降雨量、沟壑密度越大, 雨水资源化可实现潜力越大; 大于 0.25 mm 土壤水稳性团粒含量、植被盖度、治理度越大, 雨水资源化可实现潜力越小。

4.4 模型的验证

选定部分区域, 利用模型计算所得计算值与实测值之间的相对误差进行分析验证(表 2)。从表 2 可看出,

表 2 模型计算值与实测值的比较

Table 2 Comparison of calculated and observed value for regional rainwater harvesting potential assessment model

汛期降雨 /mm	沟壑密度 / $\text{km} \cdot \text{km}^{-2}$	团粒含量 /%	植被盖度 /%	治理度 /%	实测值 /mm	计算值 /mm	相对误差 /%
348.3	3.4	4.37	5.52	31.8	23.03	21.82	5.25
320.3	3.15	6.41	7.18	45.1	51.31	52.68	2.41
393	4.76	4.37	9.6	34.2	53.16	54.65	2.80
353.8	6.11	4.37	8.06	27.9	80.42	71.28	11.36
362.4	5.37	5.28	6.74	30.2	146.15	137.82	5.69
341.9	5.48	6.43	7.09	27.83	117.43	109.64	6.64
346.8	5.24	6.41	5.69	31.3	68.87	72.87	9.97
376.8	6.24	5.79	4.01	30.5	48.29	49.32	4.49
432.7	2.57	6.41	3.24	45.1	76.84	75.71	1.46
361.0	5.74	6.43	2.87	27.83	72.5	78.65	12.28
233.4	2.71	18.38	4.13	14.69	173.45	165.74	5.74
211.9	2.34	19.55	5.22	23.68	163.06	149.78	8.41
226.7	3.13	18.38	3.05	24.63	159.03	133.23	12.52
469.8	2.57	18.38	2.13	53.1	152	148.00	3.16
153.8	3.5	18.38	0.09	0.4	106.31	95.04	8.37
349.0	4.82	4.37	3.95	32.4	59.52	56.28	4.56
373.0	5.14	11.22	5.57	39.5	67.7	60.99	2.74
386.9	4.20	18.08	3.45	35.8	65.32	61.24	6.25
395.8	3.76	18.08	2.43	42.3	59.02	53.06	7.04

建模指标比较全面, 能全面反映区域雨水资源化潜力影响因素。模拟结果基本上能较为准确地反映区域雨水资源化可实现潜力趋势, 但尚有少数的预测结果和实际测定值存在较大误差, 这主要是由于本文研究为大范围的区域研究, 数据资料庞大, 增加了部分数据分析结果产生异常的可能性; 对于坡面径流数据、沟壑密度数据和汛期降雨量数据, 原始积累较少, 故仅用曲线来反映其分布趋势, 难以准确反映具体的客观实际分布情况; 植被盖度和治理度数据来源于统计资料, 可能存在一定的误差或缺陷; 模型参数较多, 在对其处理过程中, 不可避免产生一些偏差, 导致部分数据产生异常。

5 结论与讨论

本文通过对雨水资源转化系统过程中各个方面雨水资源转化量的分析, 提出了区域雨水资源化理论潜力及其可实现潜力的概念, 并利用 GIS 的空间叠加、属性提取分析功能等先进的地理分析技术, 对影响黄土高原雨水资源化可实现潜力的评价指标数据(多年平均汛期降雨量、沟壑密度、 $> 0.25 \text{ mm}$ 土壤水稳性团粒含量、植被盖度和治理度)进行有效的集成, 建立了黄土高原雨水资源化可实现潜力的定量评价模型, 其模拟结果基本上较为准确地反映了区域雨水资源化可实现潜力的分布趋势。

由于受研究条件等方面因素限制, 要将该方法推广到更广大的区域, 还有一些问题有待进一步探索。例如建模所应用的指标数据在全面性和可信用度上还有待与模型参数有关的基础研究的积累; GIS 的应用使评价的效率大大提高, 但由于 GIS 对数据类别的要求, 又降低了对评价指标科学性的要求; 同时, GIS 中的空间数据库缺乏比例尺的概念, 这对数据分析的影响尚不清楚。本研究是以黄土高原作为研究区域, 其建模参数选择主要考虑了本区域的具体特点, 当研究区域不同时, 应具体问题具体分析, 选择适宜的评价指标。

[参 考 文 献]

- [1] 吴普特, 黄占斌, 高建恩. 人工汇集雨水利用技术研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002.
- [2] 朱 强, 李元红. 论雨水集蓄利用的理论和实际意义[J]. 水利学报, 2004, (3): 60- 64.
- [3] 刘昌明, 牟海省. 我国水资源可持续开发中的雨水利用[A]. 中国雨水利用研究文集[C]. 北京: 中国矿业大学出版社, 1998: 1- 7.
- [4] 徐乾清. 对雨水利用的几点认识[A]. 中国雨水利用研究文集[C]. 北京: 中国矿业大学出版社, 1998: 8- 11.
- [5] 冯 浩, 邵明安, 吴普特. 黄土高原小流域雨水资源化潜力计算方法及评价初探[J]. 自然资源学报, 2001, 16(3): 140 - 145.

- [6] 赵西宁, 吴普特, 冯浩. 黄土高原小流域雨水资源化潜力及其可持续利用分析[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7): 38-41.
- [7] 李红军, 曹建生, 张万军. 流域雨水资源化目标潜力计算模型研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(2): 159-163.
- [8] 穆兴民, 李靖. 基于水土保持的流域降水-径流统计模型及应用[J]. 水利学报, 2004, (5): 122-127.
- [9] 张秀英, 冯学智, 赵传燕. 基于 GIS 的黄土高原小流域土壤水分时空分布模拟[J]. 自然资源学报, 2005, 20(1): 132-139.
- [10] 胡良军, 张晓萍, 杨勤科. 黄土高原区域水土流失评价数据库的建立[J]. 水利学报, 2002, (1): 80-85.
- [11] 王万忠. 黄土地区降雨特性与土壤流失关系的研究[J]. 水土保持通报, 1988, (6): 58-63.
- [12] 王万忠, 焦菊英. 黄土高原降雨侵蚀产沙与黄河输沙[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [13] 杨文治, 邵明安. 黄土高原土壤水分研究[M]. 北京: 科学技术出版社, 2000.
- [14] 吴发启, 赵晓光. 缓坡耕地侵蚀环境及动力机制分析[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2001.
- [15] 胡良军, 李锐, 杨勤科. 基于 GIS 的区域水土流失评价模型[J]. 应用基础与工程科学学报, 2000, 8(1): 1-8.
- [16] 王万忠, 焦菊英, 郝小品. 黄土高原降雨侵蚀产沙数据图集[M]. 西安: 地图出版社, 1998.
- [17] 中国科学院黄土高原综合科学考察队. 黄土高原地区土壤资源及其合理利用[M]. 北京: 科学技术出版社, 1991.
- [18] 李锐, 杨勤科. 区域水土流失快速调查与管理信息系统研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2000.

Regional rainwater harvesting potential assessment model based on GIS

Zhao Xining, Wu Pute*, Feng Hao, Wang Wanzhong

(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, National Engineering Research Center for Water Saving Irrigation at Yangling, Yangling 712100, China)

Abstract: Quantitative assessment for regional rainwater harvesting potential is very significant for macro decision-making and comprehensive planning of regional rainwater harvesting. Taking the Loess Plateau as a sample region and rainwater resources as research object, the influence factors of regional rainwater harvesting potential were analyzed systematically. Quantitative assessment indices of regional rainwater harvesting potential were defined. And the data with different origins, different scale and different types were integrated using GIS technique. Quantitative assessment model for rainwater harvesting potential was established. The assessment model plays an important role for sustainable utilization of rainwater resources and eco-environmental protection in the Loess Plateau.

Key words: Loess Plateau; rainwater harvesting potential; GIS; assessment model