

秦岭生态功能区水土保持治理效益评价

张 霞¹, 刘晓清¹, 王亚萍¹, 李占斌^{2,3}, 李 鹏²

(1. 陕西省环境科学研究院, 西安 710061; 2. 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710048; 3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:根据陕西省秦岭生态功能区近十年水土流失与治理资料,选取了合理的评价指标,建立了一套较适用的水土保持治理措施评价指标体系。采用层次分析法、灰色聚类分析法和 Topsis 法相结合,对秦岭生态功能区水土保持治理效益进行了综合分析。结果表明:秦岭生态功能区坝地面积、治理面积和水土保持林面积是评价指标体系中的主要影响因子;该地区水土保持治理效益整体呈增长趋势,各项措施已经开始发挥功效,生态效益逐步向良性发展,区域生态功能逐渐改善。该评价方法有利于秦岭生态功能区水土保持的综合管理与宏观调控,可为区域水土保持措施有效开展提供理论依据。

关键词:秦岭生态功能区;水土保持;效益评价

中图分类号:S157.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)02-0086-05

Evaluation on Benefits of Soil and Water Conversation in Ecological Function Region of Qinling Mountain

ZHANG Xia¹, LIU Xiao-qing¹, WANG Ya-ping¹, LI Zhan-bin^{2,3}, LI Peng²

(1. Shaanxi Provincial Academy of Environmental Science, Xi'an 710061, China; 2. Key Lab of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Base on related data about soil and water loss and governance of region in Qinling Mountain over ten years, suitable reasonable index was selected, suitable governance index system for soil and water conversation was established. It is the application of AHP, grey clustering method and Topsis method in the comprehensive analysis and evaluation of harnessing benefit of soil and water conversation in ecological function region of Qinling Mountain. The results show that dam land area, harnessed area and soil and water conservation forest are the main affecting factors in evaluation index system. The harness benefit demonstrated the increasing trend in this region. Each measure has begun to offer the efficiency. Ecological benefit is in benign development, and the function is gradual in improvement. The application of methods is beneficial to comprehensive management and macro-control in ecological functional region in Qinling Mountain and can provide the reliable basis for effective development of soil and water conversation measures.

Key words: ecological function region in Qinling Mountain; soil and water conversation; benefit evaluation

秦岭山系横亘于我国中部,其主体位于陕西省中南部。秦岭是我国南北自然地理、气候的分界线,黄河与长江水系的分水岭。秦岭具有水源涵养、生物多样性保育、水土保持、完整天然森林植被景观保育等生态功能,在全国的生态战略地位非常重要。由于秦岭地域辽阔,自然条件错综复杂,各地社会经济发展

不平衡,生态环境趋于恶化,生态资源流失严重。随着国家南水北调工程的实施,关中一天水经济带的建设,更加彰显出秦岭在环境保护和自然资源利用上的重要性,保护好秦岭、促进秦岭的可持续发展,对保障供水水源、南水北调工程受水区及关天经济带的国民经济发展意义重大。

收稿日期:2011-08-11

修回日期:2011-09-21

资助项目:中国科学院、国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划“流域水土过程模拟”;国家自然科学基金项目(40872208,40971161);中国博士后基金(2011M501445);国土资源部科研专项(201111020)

作者简介:张霞(1982—),女,内蒙古包头人,硕士,工程师,从事生态环境研究工作。Email:zhangxia20002000@163.com

水土保持工作在秦岭生态环境综合治理中发挥着举足轻重的作用。水土保持功能措施的实施能够有效地遏制秦岭生态功能区水土流失的恶化,有利于维护和提高秦岭地区水土资源和土地生产力。近年来在治理实践中,秦岭生态功能区综合治理技术体系取得了一定成效,但由于其水土流失严重性,目前关于如何完善水土保持治理评价体系,以及建立合理的治理措施评价方法的研究还较少;而且仅限于对单一指标进行评价,并未形成一套合理的综合评价方法^[1-4]。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

陕西秦岭生态功能区位于陕西省中南部,东连豫鄂,西接甘陇,南望巴蜀,北瞰关中。地理坐标为东经 $105^{\circ}30'$ — $110^{\circ}05'$ 和北纬 $32^{\circ}40'$ — $34^{\circ}35'$,呈东西向条带延伸,总面积 5.79 万 km^2 。行政区划上涉及西安市、渭南市、宝鸡市、汉中市、安康市和商州市6市所辖的38个县(13个县区的全部及25个县区的部分区域)、483个乡镇。

秦岭山地对我国南北气流的运行起着屏障作用,是暖温带半湿润季风气候带与北亚热带湿润气候带的天然分界,秦岭北坡属暖温带大陆性季风气候区,冬冷夏热,四季分明,雨热同季,冬春较干旱;秦岭南坡属北亚热带湿润气候区,冬温夏热,降雨较多,四季较明显,气候条件较暖温带优越;而陕西境内的秦岭对调节陕西南部气候效应显著,是关中和陕南自然地理上和气候上的分界。秦岭山高坡陡,土薄石厚,暴雨频繁,降水量大且集中,水土流失比较严重。年降水量的70%左右集中于夏秋两季,且大雨、暴雨频繁,强度大。大雨、暴雨对地表土层强烈的冲击,严重地破坏了土层结构,使土层抗蚀能力大大减弱,侵蚀强度剧增,尤其在7—9月的汛期,水力和重力侵蚀最为活跃,是该区水土流失最主要的时期。

1.2 研究方法

系统多目标决策评价是系统工程中的一种有效分析手段,使决策者在各个目标之间,各种限制条件的基础上,寻求一种合理的方法,找到“满意”的方案。包括层次分析法、灰色聚类法以及Topsis法。

本文采用系统多目标决策评价方法来评价秦岭生态功能区水土保持治理综合效益。通过层次分析为各单项指标按照效益贡献赋予权重,明确每一项功能指标贡献的差异,利用该权重值并采用灰色聚类与Topsis法对每年水土保持治理措施进行综合评价,确定每年水土保持效益等级。该体系的建立以及评价结果能够为秦岭地区生态功能的综合管理与宏观调控提供科学依据。

1.2.1 层次分析法(AHP)原理 美国运筹学家 T. L. Saaty 于 20 世纪 70 年代提出的 AHP 决策分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP), 是一种定性与定量相结合的决策分析方法, 它是一种将决策者对复杂系统的决策思维过程模型化、数量化的过程^[5-6]。这种方法可将一个复杂的问题分解为系统的若干层次, 对同层次中的各个因素进行两两比较, 得到每个要素的相对权重值, 有利于对多因素多指标的事物进行定量的科学评价。

AHP 基本原理包括递阶层次机构原理、标度原理和排序原理。首先分析问题, 确定系统的总目标, 根据目标及问题性质, 将系统区分为要素层及指标层, 逐次确定判断矩阵, 计算各因素的权重, 其规定的标度是通过每两个系统或因子比较判断相对优劣程度给出的, 判断矩阵中的标度值依据 T. L. Saaty 提出的“1—9”比较标度法作为依据, 其中 1 表示两者具有相同重要性, 3 表示前者比后者稍重要, 5 表示前者比后者明显重要, 4 表示前者比后者强烈重要, 9 表示前者比后者极端重要, 2, 4, 6, 8 表示上述相邻判断的中间值, 倒数为重要性的反比。

运用层次分析法建模, 大体上可按下面四个步骤进行: ①建立递阶层次结构模型; ②构造出各层次中的所有判断矩阵; ③层次单排序及一致性检验; ④层次总排序及一致性检验。

在确定所有判断矩阵最大特征后, 按照 $CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$ 计算一致性指标 CI, 查找相应的平均随机一致性指标 RI, 对 $n = 1, 2, \dots, 15$, Saaty 给出了相应的 RI 的值^[5]。最后按 $CR = CI / RI$, 计算随机一致性比值 CR。一般情况下, 当 $CR \leq 0.1$ 时, 认为判断矩阵有满意的一致性, 可以进行层次单排序; 当 $CR > 0.1$ 时, 认为判断矩阵的一致性偏差太大, 需要对判断矩阵进行调整, 直到使其满足 $CR \leq 0.1$ 为止^[5-7]。

1.2.2 灰色聚类分析法原理 在系统论和控制论中, 常借助颜色来表示研究者对系统内部信息和对系统本身的了解及认识程度, “黑”表示信息完全缺乏, “白”表示信息完全, “灰”表示信息不充分、不完全。在处理实际问题时, 人们对一些不确知的因素忽略不计, 才把某些灰色系统当作白色系统来认识和处理, 所以灰色系统是普遍存在的。

灰色聚类是根据灰色关联矩阵或灰数的白化权函数将一些观测指标或观测对象划分成若干个可定义类别的方法。一个聚类可以看作是属于同一类的观测对象的集合, 以使复杂系统简化, 通过灰色聚类, 可以检查许多因素中是否有若干个因素大体上属于同一类, 使我们能用这些因素的综合平均指标或其中的某一个因素来代表这若干个因素而使信息不受严重损失。

灰色定权聚类可按下列步骤进行:

①给出 j 指标 k 子类白化权函数 $f_j^k(\cdot)(j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, s)$; ②确定各指标的聚类权 $n_j(j=1, 2, \dots, m)$; ③从第一步和第二步得出的白化权函数 $f_j^k(\cdot)(j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, s)$, 聚类权 $n_j(n=1, 2, \dots, m)$ 以及对象 i 关于 j 指标的观测值 $x_{ij}(i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$, 计算出灰色定权聚类系数 $\sigma_i^k = \sum_{j=1}^m f_j^k(x_{ij}) \cdot n_j, i=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, s$; ④若 $\max_{1 \leq k \leq s} \{\sigma_i^k\} = \sigma_i^{k^*}$, 则断定对象 i 属于灰类 k^* , 当有多个对象同属于 k^* 灰类时, 还可以进一步根据综合聚类系数的大小确定同属于 k^* 灰类之各个对象的优劣或位次^[8-14]。

1.2.3 Topsis 法原理 Topsis(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)法是系统工程有限方案多目标决策分析的一种常用方法, 可用于效益评价、决策、管理多个领域^[13-14]。Topsis 法的基本思想是基于归一化后的原始数据矩阵, 找出有限方案中的最优方案和最劣方案(分别用最优向量和最劣向量表示), 然后分别计算诸评价对象与最优方案和最劣方案的距离, 获得各评价对象与最优方案的相对接近程度, 以此作为评价优劣的依据。设有 n 个待评价对象, 每个评价对象有 m 个评价指标, 则有评价指标数据矩阵 A :

$$A = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1m} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{n1} & X_{n2} & \cdots & X_{nm} \end{bmatrix} \quad \begin{pmatrix} i=1, 2, 3, \dots, n \\ j=1, 2, 3, \dots, m \end{pmatrix}$$

对高优(越大越好)、低优(越小越好)指标分别进行归一化变换, 即

$$Z_{ij}^* = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n X_{ij}^2}} \text{ 或 } Z_{ij}^* = \frac{1/X_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (1/X_{ij})^2}}$$

归一化得到矩阵 Z^* : $Z^* = (Z_{ij}^*)_{n \times m}$, 然后通过

表 1 秦岭生态功能区多年水土保持功能统计指标

km²

年份	水土保持 林面积	水土保持 种草面积	经济果林 面积	封山育林 面积	梯田面积	坝地面积	治理面积
2001	12493.4	1161.1	3630.9	3553.3	3110	9.1	26838.7
2002	12604.2	1087.8	3718.7	3495.4	3058.1	9.7	26713.8
2003	12694.5	1108.6	3693.2	3576.6	2780.2	9.7	26755.3
2004	12904.4	1134.5	3791.7	3810.2	2934.1	9.8	27363.4
2005	13143.3	1161.5	3916.7	4141.6	2959.7	10.2	28105.8
2006	13290.3	1181.8	4056.2	4385.5	3018.4	10.2	28638.1
2007	13407.8	1197.9	4143.7	4598.5	3029.1	10.2	29046.7
2008	13440.3	1223.6	4107.9	4987.2	3021.3	10.2	29388.5
2009	13549.7	1229.9	4130.2	5372.3	3058.7	10.2	29913.4

层次分析法确定各个指标的权重 W_j , 从而构造出规范化加权矩阵 $Z = W_j \times Z^*$, 即

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1m} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{nm} \end{bmatrix}$$

其中各列最大、最小值构成的最优、最劣向量分别记为:

$$Z^+ = (Z_{\max 1} \ Z_{\max 2} \ \cdots \ Z_{\max m}), Z^- = (Z_{\min 1} \ Z_{\min 2} \ \cdots \ Z_{\min m})$$

第 i 个评价对象与最优、最劣方案的距离分别为:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_{\max j} - Z_{ij})^2} \text{ 和 } D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_{\min j} - Z_{ij})^2}$$

第 i 个评价对象与最优方案的接近程度 CI (值越大综合效益越好)为 $CI = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}$

方案优劣排序: 将 CI 由大到小依次排序, CI 大者为优。

2 结果与分析

2.1 评价指标选取

水土保持功能是由治理程度、地表径流拦蓄水量、拦蓄泥沙量、林草覆盖率等因素综合作用的体现, 各项指标对水土保持功能的发挥都有着重要作用。根据秦岭生态功能区和资料收集情况, 对秦岭生态功能区 2001—2009 年水土保持治理的动态变化进行分析, 建立了该区域水土保持治理的效益评价体系, 评价指标由水土保持林面积、水土保持种草面积、经济果林面积、封山育林面积、梯田面积、坝地面积组成, 治理效果由治理面积来反映(表 1), 利用以上 7 项指标作为水土保持治理内涵的指标, 充分体现了水土保持特点, 具有针对性、重点性、可比性和可操作性, 为客观、定性评价秦岭水土保持功能具有良好的表征作用^[4,15]。

2.2 层次分析结果

采用层次分析法对上述评价体系各指标权重进行评判(见表 2),评判结果将为灰色聚类与 Topsis 法计算服务。评判标准中 $CI_j = 0$, 故 $CR = 0 < 0.10$, 由此可知总排序符合一致性要求, 各个因素评价指标所得权值符合评价要求, 所以总排序是成功的。从层次分析综合结果可以得出各指标权重, 以确定各指标在评价体系的名次; 在秦岭生态功能区生态治理过程中, 坝地面积、治理面积和水土保持林面积是该地区生态治理评价体系的主要影响因子, 今后生态治理效

益评价应主要针对这几项指标展开研究。

从指标排序可以看出, 秦岭生态区各指标中, 坝地面积、治理面积和水土保持林面积已占到所有指标权重的 65%, 在生态功能区中地位十分重要, 是秦岭地区整体水土保持治理效益得以发挥的主要措施, 在今后的水保措施工作部署中, 应加大力度增加坝地面积、治理面积和水土保持林面积。其他水保措施虽然所占权重较小, 措施发挥效益较弱, 但其功效也不容忽视, 而且保持了生态区生物多样性, 也要加以足够重视, 充分发挥其功效, 以使秦岭生态区发挥最大效益。

表 2 评价系统层次总排序计算结果

指标	水土保持林面积	水土保持种草面积	经济果林面积	封山育林面积	梯田面积	坝地面积	治理面积
权重	0.15	0.05	0.1	0.08	0.12	0.3	0.2
排序	3	7	5	6	4	1	2

2.3 灰色聚类分析结果

灰色聚类分析法在进行水土保持治理效益评价中, 不但可以得出一定的评价分值, 还可以根据实际需要和国家规定进行评价等级划分, 评价结果真实可靠; 评价结果不是绝对的概念, 而是一种相对的概念, 是在区域或者时间范围内, 体现出各评价单元质量的相对优良程度, 以便采取不同的措施加以应对。

根据资料, 选取 2001—2009 年整个秦岭地区作

为研究对象, 分别进行效益评价, 上述七项评判指标能综合体现水土保持治理的各个方面。根据层次分析得到的权重大小, 用灰色聚类分析法进行治理效益等级划分, 将分值在 0~40 之间定为低, 在 40~70 之间定为中, 在 70~100 定为高, 评价结果是一种相对的概念, 体现出各评价单元质量的相对优劣程度。然后对历年水土保持治理情况进行评分, 结果如表 3 所示。

表 3 灰色聚类评价分值

年份	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
评价分值	39.92	39.90	36.42	42.75	58.65	70.98	75.62	78.77	80.65
评价等级	低	低	低	中	中	高	高	高	高

由表 3 可以看出, 2001—2003 年的水土保持治理效益相对较差, 2003 年最差。这是由于秦岭生态功能区规划以来, 各项水土保持措施正在完善, 植被与工程措施所发挥的功能存在一定的滞后性, 水土流失得不到有效控制所致。自 2004 年起, 水土保持治理效益整体呈增长趋势, 说明秦岭地区各项措施已经开始发挥功效, 生态效益越来越好, 且稳步向良性发展, 这有利于该区域生态功能的改善。

2.4 Topsis 结果检验

为验证灰色聚类分析方法对秦岭生态功能区水土保持治理效益评价的准确性, 采用 Topsis 法对秦岭水土保持治理效益进行评价, 结果表明从 2001 年至 2009 年评价分值分别为: 0.20, 0.31, 0.28, 0.38, 0.58, 0.67, 0.74, 0.85 和 0.97。

对两种方法的分值进行线性回归分析, 从回归结果可以看出灰色聚类法和 Topsis 法所得到的评价分值的直线拟合方程为 $y = 0.0143x - 0.281$ (y 代表 Topsis 分值, x 代表灰色聚类分值), 其拟合程度很高, 相关系数 R^2 达到 0.950 7, 说明两种方法在水土

保持综合效益评价方面具有一定的可靠性, 可为秦岭生态功能区水土保持治理的效益评价工作提供了科学方法, 为生态治理效益有效的开展提供理论依据。

3 结 论

本研究根据秦岭生态功能区近 10 a 水土流失与治理资料, 基本掌握了陕西省秦岭地区水土保持治理措施及治理效果动态变化情况, 将层次分析法、灰色聚类分析法和 Topsis 法相结合, 对秦岭生态功能区水土保持治理效益进行了综合分析评价, 得出以下结论:

(1) 层次分析法可以很好地刻画评判体系中各指标的权重, 坝地面积、治理面积和水土保持林面积是该地区生态治理评价的主要影响因子, 可为今后实际的治理措施选取提供参考。

(2) 该区域 2001—2003 年水土保持治理效益相对较差, 2003 年最差, 这是由于秦岭生态功能区规划以来, 各项水土保持措施正在完善, 植被与工程措施所发挥的功能存在一定滞后性, 水土流失得不到有效

控制所致;自 2004 年起,水土保持治理效益整体呈增长趋势,说明秦岭地区各项措施已经开始发挥功效,生态效益越来越好,且稳步向良性发展,有利于该区域生态功能的改善。

(3)三种方法相结合用于水土保持生态治理效益评价中,不但可以得出一定的评价分值,还可以根据实际需要和国家规定进行评价等级划分,评价结果与实际情况相符合,证明该方法体系的科学可行性。

在今后的水土保持工作部署中,应加大力度确保坝地面积、治理面积和水土保持林面积的增加,同时也应加强其他水土保持措施,加快数据库建设和信息资源共享平台建设,加强秦岭生态环境保护的科学研究,加强水资源保护、生物多样性保护、水土保持和生态恢复等科研工作,实现对秦岭生态保护工作成效的动态变化趋势的科学分析和预测,可为区域水土保持措施有效开展提供科学的理论依据,有利于秦岭生态功能区水土保持治理工作的综合管理与宏观调控。

参考文献:

- [1] 王筱明.生态位适宜度评价模型在退耕还林决策中的应用[J].农业工程学报,2008,23(8):113-116.
- [2] 王晓峰,张晖,董小平,等.南水北调中线工程陕西水源区生态环境质量综合评价[J].水土保持通报,2010,30(3):230-232,236.
- [3] 胡春宏,陈建国,孙雪岚,等.黄河下游河道健康状况评价与治理对策[J].水利学报,2008,39(10):1189-1196.
- [4] 张光辉,土壤侵蚀模型研究现状与展望[J].水科学进展,2002,13(5):389-396.
- [5] Saaty T L. The analytic hierarchy process[M]. New York:McGraw Hill,Inc. 1980:22-71.
- [6] 王筱明.生态位适宜度评价模型在退耕还林决策中的应用[J].农业工程学报,2008,23(8):113-116.
- [7] 吴旭,王绪本,阚瑗珂,等.基于层次分析法的流域生态决策评价系统[J].成都理工大学学报:自然科学版,2011,38(2):126-131.
- [8] 厉彦玲.基于灰色聚类分析方法的生态环境质量综合评价模型[J].测绘科学,2007,32(5):77-79.
- [9] Yuan J L, Zhong L. The Dynamic Grey Radial Basis Function Prediction Model and Its Applications[C] // Proceeding of IEEE ICICIC06,2006.
- [10] 邓聚龙.灰预测与灰决策[M].修订版.武汉:华中科技大学出版社,2002.
- [11] Lin Y, Liu S F. A systemic analysis with data(II)[J]. International Journal of General Systems(UK),2000,29(6):1001-1013.
- [12] 刘斌,刘思峰,翟振杰,等. GM(1,1)模型时间响应函数的最优化[J].中国管理科学,2003,11(4):54-57.
- [13] 朱明润,乔明叶,梁士奎,等.改进的 TOPSIS 模型在污水灌溉安全性评价中的应用[J].长江科学院院报,2010,27(8):25-28.
- [14] 方崇,苏超,黄伟军.基于信息熵大型灌区农业旱情的 TOPSIS 综合评价[J].中国农村水利水电,2011(5):74-76,79.
- [15] 胡良军,张晓萍,杨勤科,等.黄土高原区域水土流失评价数据库的建立[J].水利学报,2002,33(1):81-85.

(上接第 85 页)

- [5] Welker J M. Isotopic(¹⁸O) characteristics of weekly precipitation collected across the USA; an initial analysis with application to water source studied[J]. Hydrol. Process,2000,14(8):1449-1464.
- [6] 王仕琴,宋献方,肖国强,等.基于氢氧同位素的华北平原降水入渗过程[J].水科学进展,2009,20(4):495-501.
- [7] Soulsby C, Malcolm R, Helliwell R, et al. Isotopic hydrology of the Allta a' Mharcaidh catchment, Cairngorms, Scotland; implications for hydrological pathways and residence times[J]. Hydrol. Process,2000,14(4):747-762.
- [8] Rains M C, Mount J F. Origin of shallow ground water in an alluvial aquifer as determined by isotopic and chemical procedures[J]. Ground Water,2002,40(5):552-563.
- [9] 郭晓军.泥石流流域蒋家沟水文特性初步研究[D].成都:中科院成都山地灾害与环境研究所,2010.
- [10] 杜榕桓,康志成,陈循谦,等.云南小江泥石流综合考察与防治规划研究[M].重庆:科学技术文献出版社重庆分社,1987.
- [11] 刘进达,赵迎昌,刘恩凯,等.中国大气降水稳定同位素时空分布规律探讨[J].勘察科学技术,1997(3):34-39.
- [12] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus,1964,16(4):436-468.
- [13] 王恒纯.同位素水文地质学概论[M].北京:地质出版社,1991.