

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0123

戴仕宝,周亮广,叶雷,等.江淮丘陵地区塘坝系统水适应性机制与测度分析[J].南水北调与水利科技,2018,16(5):41-49. DAI S B, ZHOU L G, YE L, et al. Mechanism and measurement of the water adaptability of the farm pond in Jianghuai Hilly Area [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5): 41-49. (in Chinese)

# 江淮丘陵地区塘坝系统水适应性机制与测度分析

戴仕宝<sup>1</sup>,周亮广<sup>1</sup>,叶雷<sup>2</sup>,王春<sup>1</sup>,王子龙<sup>1</sup>

(1. 滁州学院 地理信息与旅游学院, 安徽 滁州 239012; 2. 华东师范大学 城市与区域科学学院, 上海 200062)

**摘要:** 丘陵地区塘坝系统是适应水资源需求的产物,是人水和谐的表现。以位于江淮丘陵区两个小流域(样区1面积1.14 km<sup>2</sup>,样区2面积1.27 km<sup>2</sup>)为研究样区,以高分辨率遥感影像、1:10000 DEM以及塘坝实测数据(面积和深度)等为数据源,构建了塘坝分布地形权重指数(W)、塘坝与土地利用适应性指数(P)、塘坝水资源供需适应性指数(R)等,定量研究塘坝系统水适应性机制。研究表明:研究样区林草地为主要土地利用类型(>50%),其次为耕地(约35%),而塘坝在两个样区面积占比分别为5.8%和2.82%。地形权重指数W显示高位塘坝占绝对优势。塘坝与土地利用适应性指数P显示样区1适应性更佳,而样区2适应性较差。在频率85%的年降水量情景下,塘坝供水与耕地综合灌溉需水的供需适应性指数R分别为1.02和0.59,与指数P结论相吻合。研究认为,研究区塘坝、耕地、地形三者之间具有相互制约和适应的关系。

**关键词:** 塘坝系统人水和谐;水适应性;水资源供需;适应性机制;适应性测度;江淮丘陵

中图分类号:TV213 文献标志码:A 文章编号:1672-1683(2018)05-0041-09

## Mechanism and measurement of the water adaptability of the farm pond in Jianghuai Hilly Area

DAI Shibao<sup>1</sup>, ZHOU Lianguang<sup>1</sup>, YE Lei<sup>2</sup>, WANG Chun<sup>1</sup>, WANG Zilong<sup>1</sup>

(1. School of Geographic Information and Tourism, Chuzhou University, Chuzhou 239012, China;

2. School of Urban and Regional Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** Pond system in the hilly area is a result of the adaptation to water demand, embodying the harmonious relationship between water resources and human beings. We took two small watersheds ( $\tilde{N}$ : 1.14 km<sup>2</sup>;  $\hat{O}$ : 1.27 km<sup>2</sup>) as the study areas, and developed terrain weight index, pond and land use adaptability index, and water supply and demand balance index to quantitatively illustrate the water adaptability mechanism of the pond system. The data set included high resolution remote sensing images, 1:10000 DEM, and measured data (depth and size) of the ponds. The results are as follows. Forest and grassland (more than 50%) was the dominant land use type in the study areas. The cultivated land (about 35.5%) came second. Farm ponds covered only 2.82% and 5.8% of the study areas. The terrain weight indexes indicated that the high lying ponds were absolutely dominant. The land utilization index indicated that study area  $\tilde{N}$  had better adaptability than study area  $\hat{O}$ . Under the circumstance of precipitation probability  $P=85\%$ , the water supply and demand balance index was 1.02 and 0.59 respectively. There were restrictions and adaptations between the ponds, farmland, and terrain in the study area.

**Key words:** human water harmony of pond system; water adaptability; water supply and demand; adaptive mechanism; adaptability measurement; Jianghuai hilly area

收稿日期:2018-04-20 修回日期:2018-06-28 网络出版时间:2018-07-04

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180703.1844.004.html>

基金项目:国家自然科学基金(41571398);安徽省人文社科重点研究基地重点项目(SK2015B28, SK2015A176);安徽省教育厅自然科学基金项目(KJ2013Z246)

**Funds:** National Natural Science Foundation of China (41571398); Foundation of the Key Research Base of Humanities and Social Sciences of Anhui Province (SK2015B28, SK2015A176); The Natural Science Research Foundation of Anhui Provincial Department of Education (KJ2013Z246)

作者简介:戴仕宝(1970-),男,安徽芜湖人,教授,博士,主要从事流域水文水资源研究。E-mail: shibaodai@163.com

适应性是来自生态学的一个名词, 现已被广泛应用在多个领域<sup>[1]</sup>。近年来, 水资源适应性研究也逐渐得到关注。受人类活动和气候变化的影响, 地表水系统正在发生着变化。为应对因环境变化带来的水系统的变化, 人们认识到水资源的利用和管理必须从控制、预测向适应性利用和管理转变<sup>[2]</sup>。研究者从适应性管理的内涵<sup>[2-5]</sup>、运用<sup>[6-7]</sup>以及适应性管理与综合性管理的比较<sup>[8-9]</sup>等方面开展了大量研究。综合起来看, 当前的研究较多地侧重于宏观层面<sup>[5]</sup>, 并主要从管理的角度出发, 而从微观层面, 具体研究景观(地理事物)的水适应性还较少。而开展微观(景观)层面的水适应性研究<sup>[2-3]</sup>, 不仅可以丰富水资源适应性管理研究理论, 提升其应用价值, 而且对于实践更具有指导意义。

为了灌溉需要, 世界各地修建了大量塘坝, 形成了独特的塘坝系统景观<sup>[10-13]</sup>。据统计, 在美国大陆塘坝的数量约为 350 万处, 占陆地水域面积的 29%<sup>[14]</sup>。截止 2011 年, 我国塘坝工程数量为 456 51 万处, 总容积 303. 17 亿 m<sup>3</sup><sup>[15]</sup>。江淮丘陵位于长江与淮河之间, 是我国塘坝分布最为典型的区域<sup>[15-16]</sup>。该区域暖温带与亚热带的过渡带, 气温和降水条件适合多种农作物的种植。但该地区地形起伏不平, 岗冲交错, 河流发育不佳, 导致地表径流难以蓄用, 干旱灾害频繁发生<sup>[17-18]</sup>。为发展农业生产, 长期以来该区域修建了大量塘坝。这些塘坝的修建是人们适应该区域地形地貌、降水等自然条件, 因地制宜地改造利用自然的结果, 形成了独特的农业水适应性景观<sup>[19]</sup>。近年来, 关于江淮丘陵地区塘坝在灌溉、抗旱、调节径流及其他生态功能的作用已开展了大量研究<sup>[20-23]</sup>。本文以位于江淮丘陵区的安徽省滁州市两个小流域为研究样区, 在定量描述、分析塘坝容量及其分布与地形地貌、土地利用格局、水资源供需等的关系的基础上, 探讨分析该区域塘坝系统水适应性机制及测度特征。

## 1 数据和方法

### 1.1 研究区概况

选取滁州市南谯区大苏村(样区 1)和明光市高稻场村(样区 2)两个小流域为研究样区。两个样区均属于北亚热带向暖温带过渡的湿润季风气候, 四季分明, 阳光充足, 雨热同季, 年平均气温 15 ℃, 年降水量 900~1 000 mm。区内地形为低缓丘陵, 地貌岗冲相间, 岗冲地带坡度较陡的地块多为旱地, 主要农作物为小麦和玉米。岗地多为人工林和草地, 岗冲地带坡度平缓的地块以及冲田多为水田, 主要

农作物为水稻。研究区的塘坝均为人工修建而成, 流域内无外界地表水源输入。

### 1.2 数据来源与技术方法

研究数据主要包括遥感影像数据、水体数据、地形数据。

遥感数据为 Quickbird 影像, 分辨率为 0. 6 m, 拍摄日期分别为 2013 年 4 月 10 日(样区 1)、2017 年 2 月 2 日(样区 2)。利用 ArcGIS 10. 1 软件对影像进行配准, 并进行要素矢量化, 得到研究土地利用分类图。在实地详细调查的基础上, 确定研究样区的土地利用类型有旱地、水田、园地、林地、草地、水体、居民区。

塘坝水体数据来源于实地测量。使用南方 S86GPS RTK 测量水体轮廓的经纬度坐标和高程信息; 借助充气船, 利用南方 S86GPS RTK 和测量尺测量水体的深度数据, 测量精度为厘米。使用 CASS 软件对测量数据进行处理, 获得研究区域水体的水面面积、体积、平均深度、库容量和水面高程等信息。将所测水体轮廓的坐标数据导入 ArcGIS 10. 1, 并矢量化水体轮廓, 得到研究区域的水体分布图。测量时间选取与遥感影像拍摄季候相近的时间, 其中样区 1 的测量时间为 2015 年 4 月 6 日-8 日, 样区 2 的测量时间为 2017 年 2 月 19 日。对比水体实测面积和遥感影像解译结果, 平均误差小于 1%。

地形数据为研究区 1: 10 000 DEM 数据。利用 ArcGIS 10. 1 软件提取相关地形因子, 包括海拔高度、坡度、山脊线和山谷线, 并对高度、坡度等信息进行分级, 并统计相应的水体基本特征数值。此外利用 ArcGIS 进行缓冲区分析。

### 1.3 理论与方法

水是塑造地表最重要的自然要素, 也是人类不可或缺的资源。水适应性从其一般意义来说, 指的是适应水的特征(量、质及其变化)而形成的自然事物或人类活动的某种状态和特征, 如河道对径流的适应、生物对咸淡水的适应、动植物对水量多寡的适应、建筑形式对水的适应、农业对水的适应, 等等。从人类活动对水的适应性角度看, 一方面, 人类通过改造自然地貌来适应水的特征(如修筑河堤防止洪水泛滥)和对水的需求(修建塘坝水库拦蓄水源), 这种改造形成了水适应性景观<sup>[19]</sup>。这一适应性可以称之为自然适应性; 另一方面, 人类对水的利用要适应水系统(量、质及其变化)、自然系统(如生态基流)、社会系统的需要, 因此要研究水资源的适应性

利用和管理的问题<sup>51</sup>。这一适应性可以称之为社会适应性。无论是自然适应性,还是社会适应性,其目标是一致的,这就是“人水和谐”。左其亭等对水资源适应性利用及人水和谐进行了系统性研究,提出了人水和谐理论<sup>[24,25]</sup>,并给出了具体的计算模型。本文认为,水系统是自然系统中一个重要组成部分,是一个开放的复杂巨系统。不同层级、不同类别系统的水适应性问题有着不同性质、特征和表现。人水和谐理论提出了水资源利用和管理研究的新的视角和方向,其实用性(对具体工作的指导作用)还需结合具体的水资源适应性问题开展研究。本文以江淮丘陵地区两个小流域塘坝为研究对象,从塘坝形成的自然过程出发,研究分析塘坝分布与地形、土地利用、水资源供需间的适应性特征,构建适应性测度参数,探讨其人水关系和谐的特征。

## 2 研究结果

### 2.1 研究区土地利用特征

研究样区土地利用特征统计见表1和图1、图2。样区1和样区2面积基本相当,分别为1.14 km<sup>2</sup>和1.27 km<sup>2</sup>。区内林地、草地为主要的土地利用类型<sup>[26]</sup>,合计面积占比均超过50%。其中样区1以人工林为主,郁闭度较大,而样区2则为疏林、灌丛和荒草地;其次为耕地,占比35%左右,包括水田、旱地和园地,其中样区2水田相对偏少,以旱地

表1 研究区土地利用面积分布

Tab.1 Size of land use types in the study areas

类型	样区1		样区2	
	面积/m <sup>2</sup>	占比(%)	面积/m <sup>2</sup>	占比(%)
林地	612 107.15	53.50	341 952.6	26.99
水田	177 301.26	15.50	149 293.6	11.79
旱地	140 703.6	12.30	329 871.2	26.04
园地/草地	78 433.39	6.90	4015 28.6	31.70
塘坝	66 122.3	5.80	35 735.46	2.82
居民地	41 836.99	3.70	8 399.75	0.66

注:表示样区1为园地,样区2为草地

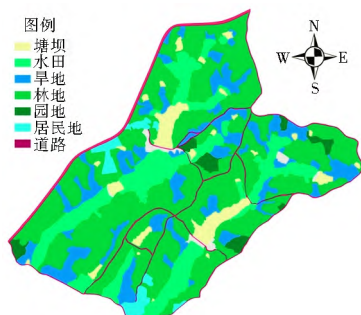


图1 样区1土地利用分布

Fig.1 Spatial distribution of land use types in study area 1

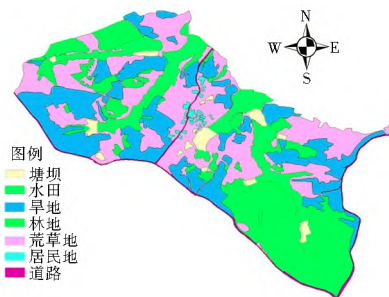


图2 样区2土地利用分布

Fig.2 Spatial distribution of land use types in study area 2

为主,而塘坝仅占约4%的比重。样区1塘坝约为样区2的两倍。

### 2.2 塘坝分布总体特征

塘坝面积、库容、深度的分布情况统计见表2、表3、表4。样区1塘坝总数为26个,水体面积为66 122.3 m<sup>2</sup>,占总面积5.8%,容积149 771.2 m<sup>3</sup>。塘坝平均面积2 543 m<sup>2</sup>,平均容积5 760 m<sup>3</sup>。塘坝面积越大,数量越少,1 000 m<sup>2</sup>以下的有17个,而大于10 000 m<sup>2</sup>的大型塘坝仅有2个。但小于10 000 m<sup>2</sup>的塘坝总面积为25 815.8 m<sup>2</sup>,而大于10 000 m<sup>2</sup>的大型塘坝总面积为40 306.5 m<sup>2</sup>,大型塘坝在面积上占绝对优势地位。从塘坝库容分布看,小于10 000 m<sup>3</sup>的塘坝有24个,但总库容仅14 501.3 m<sup>3</sup>,而大于10 000 m<sup>3</sup>的塘坝虽只有2个,但库容却有70 686.5 m<sup>3</sup>,在蓄水量上也占绝对优势地位。从塘坝深度上看,多数塘坝深度小于1 m,深度大于1.6 m的仅有2个。总体来说,样区1大塘坝数量少,但面

表2 研究样区塘坝面积分布

Tab.2 Size distribution of ponds

等级	面积/m <sup>2</sup>	样区1		样区2	
		数量	面积/m <sup>2</sup>	数量	面积/m <sup>2</sup>
1	< 500	6	1 898.9	2	806.35
2	500~1 000	11	7 471.8	4	3 049.28
3	1 000~2 000	4	6 253.4	4	5 114.44
4	2 000~10 000	3	10 191.7	5	26 765.39
5	> 10 000	2	40 306.5	0	0

表3 研究样区塘坝容量分布

Tab.3 Capacity distribution of ponds

等级	容量/m <sup>3</sup>	样区1		样区2	
		数量	容量/m <sup>3</sup>	数量	容量/m <sup>3</sup>
1	< 500	4	1 439.9	1	332.49
2	500~1 000	6	4 217	2	1 697.07
3	1 000~2 000	8	10 082.9	2	3 850.57
4	2 000~10 000	6	25 107.5	6	15 893.53
5	> 10 000	2	108 923.9	4	75 411.56

表 4 研究样区塘坝深度分布  
Tab. 4 Depth classification of ponds

等级	平均深度/m	数量	
		样区 1	样区 2
1	< 0.4	7	0
2	0.4~ 0.8	13	1
3	0.8~ 1.2	3	0
4	1.2~ 1.6	1	2
5	> 1.6	2	11

积大、蓄水多,小塘坝虽然数量多,但蓄水少。

而样区 2 塘坝总数只有 15 个,水面面积 35 735.46 m<sup>2</sup>, 占总面积 2.81%, 只有样区 1 的一半; 容积 97 185.22 m<sup>3</sup>, 只有样区 1 的 65%。塘坝平均面积 2 382 m<sup>2</sup>, 与样区 1 基本相当; 平均容积 6 479 m<sup>3</sup>, 比样区 1 大约 13%。小塘坝相对较少。大于 10 000 m<sup>3</sup> 的塘坝有 4 个, 深度均在 2 m 以上, 蓄水量占总塘坝的 78%, 占绝对优势。总体上, 样区 2 塘坝以蓄水量 2 000 m<sup>3</sup> 以上的居多, 但数量较少, 蓄水量比样区 1 少 1/3 以上。

### 2.3 塘坝分布与地形的关系

研究区属于典型的低山丘陵地形, 区内岗冲交错, 塘坝主要分布在岗地相夹的冲沟地段, 当地百姓有“两山夹一洼, 中间打个坝”的说法。在不同海拔高度的分布差异明显, 海拔较低处的塘坝面积大于海拔较高处。样区 1 在海拔 60~ 67 m 区域的塘坝面积最大, 而样区 2 主要集中在 80~ 90 m。从坡度上看, 塘坝主要分布在坡度 10° 以下区域。上述特征的形成可能与工程难易程度有关。在地形平缓处筑坝, 可以实现以较低高程的塘坝拦蓄较多的径流, 从而降低工程造价和施工难度。

### 2.4 耕地类型与塘坝分布关系

研究区主要耕地类型为水田、旱地。由图 1、图 2 可知, 水田基本都位于谷底地区, 并且基本位于坝体下方, 顺着坡度减少的方向连续分布, 集中程度比较高。旱地分布相对比较零散, 主要分布于谷地两侧的坡地以及高位水体上方的谷底地区。

为了解研究区耕地类型与塘坝分布关系的具体特征, 本文利用 ARCGIS 缓冲区分析工具, 以塘坝为缓冲对象, 分别以 25 m、50 m、75 m、100 m、125 m 为缓冲半径做缓冲区分析, 统计水田和旱地在距离塘坝不同范围内分布面积与各自总面积的比重, 统计结果见图 3。由图 3 可知, 两样区中水田表现出极为相似分布特征: 在距离塘坝 0~ 125 m 范围内水田面积比重都呈现抛物线分布, 50~ 75 m 范围内分布比重最高, 分别向两侧递减, 尤其在 100~

125 m 范围递减速率最大; 水田主要分布在 25~ 75 m 范围内, 比重接近 50%。而旱地在两样区分布差异明显: 在距离塘坝 0~ 50 m 范围内, 两样区旱地都呈递增趋势; 但在 50~ 125 m 范围内, 样区 1 旱地逐渐递减, 而样区 2 仍呈增长趋势。在调查中我们也发现样区 1 的岗脊线两侧基本都为林地, 而样区 2 岗脊线两侧林地较少, 基本都被开垦成为了旱地。

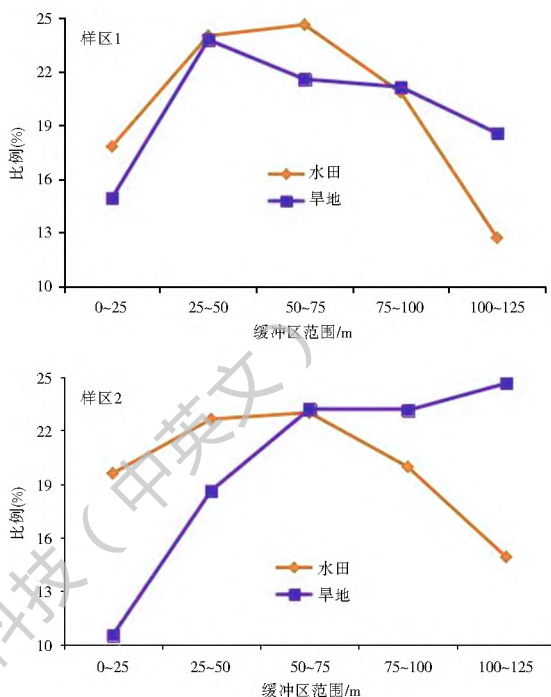


图 3 不同距离缓冲区内旱地、水田所占比例

Fig. 3 Ratio of dry land and paddy land in the buffer area of different distances

### 2.5 塘坝系统的适应性机制与测度

#### 2.5.1 塘坝分布与地形的适应性机制及测度

修筑塘坝首先要考虑选择合适的地形, 研究区塘坝与地形的适应性特征主要表现在如下几个方面。(1) 海拔较高的区域一般集水区较小, 因此小的塘坝主要分布在海拔较高区域。(2) 大的塘坝有较高的供水可靠性, 但为了降低工程造价以及施工难度, 一般修建于地势平缓的区域。(3) 塘坝从高位地形向低位地形区依次错落分布, 高位的塘坝和低位的塘坝之间一般通过水渠相联通。塘坝主要向位于其下部的水田供水, 形成自流灌溉系统, 形成了以位于沟谷底部的渠道为主干的“串珠状”分布特征(图 4)。总体而言, 研究区塘坝呈现出显著的受地形约束并与地形相适应的特征。

本文构建塘坝分布地形权重指数( $W$ , 简称地形分布指数)来定量表达塘坝分布与地形的关系。在江淮丘陵地区, 塘坝基本都修建在沟谷中, 而沟谷的发育与地形密切相关, 沟谷分布的位置反映了地形

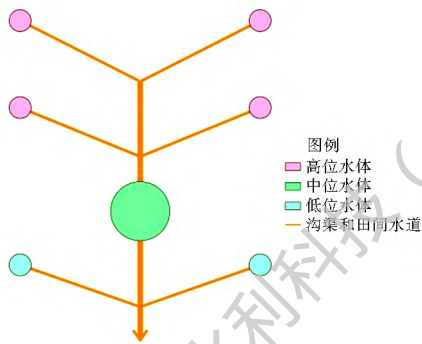


图4 塘坝系统“串珠状”分布特征

Fig. 4 Bead string pattern of the pond system

的差异。参照霍顿水系级别分类方法<sup>[27]</sup>, 本文定义位于沟谷源头最上部的沟谷为一级沟谷, 两条一级沟谷汇聚后的沟谷为二级沟谷, 两条二级沟谷汇聚后的沟谷为三级沟谷, 依此类推。从地形分布上看, 一级沟谷都位于二、三级沟谷之上。分别统计位于不同等级沟谷的塘坝的数量和面积, 就可以获得塘坝分布与地形关系的量化参数。综合考虑不同等级塘坝分布的地形位置及面积, 定义第  $i$  级沟谷塘坝分布地形分布系数( $C_i$ )如下:

$$C_i = S_i / S_t \times N_i / N_t \quad (1)$$

式中:  $S_i$  为位于不同等级沟谷上的塘坝的面积;  $N_i$  为位于不同等级沟谷上的塘坝的数量;  $S_t$  代表研究区流域总面积;  $N_t$  代表研究区塘坝总数量。

定义第  $i$  级沟谷塘坝分布地形权重指数( $W_i$ )为:

$$W_i = C_i / \sum C_i \quad (2)$$

$W_i$  越大说明处于第  $i$  级沟谷分布的塘坝分布占优势地位越明显。

在样区 1, 只有一级和二级沟谷,  $S_1 = 25\ 887.8\ \text{m}^2$ ,  $S_2 = 40\ 306.5\ \text{m}^2$ ,  $N_1 = 24$ ,  $N_2 = 2$ 。计算得:  $W_1 = 0.89$ ,  $W_2 = 0.11$ 。可见, 一级沟谷与二级沟谷的塘坝地形分布指数明显不同,  $W_1$  是  $W_2$  的 7.7 倍, 位于地形位置比较高的塘坝占有明显的优势地位。

在样区 2, 也存在二级沟谷,  $S_1 = 26\ 946.95\ \text{m}^2$ ,  $S_2 = 8\ 788.51\ \text{m}^2$ ,  $N_1 = 13$ ,  $N_2 = 2$ 。计算得:  $W_1 = 0.95$ ,  $W_2 = 0.05$ ,  $W_1$  为  $W_2$  的 19.8 倍, 同样表现出地势上高位的塘坝占绝对优势。

## 2.5.2 土地利用与塘坝分布的适应性机制与测度

研究区主要耕地类型为水田和旱地。水田一般位于谷地中, 并自上而下呈阶梯状分布(即梯田), 而旱地则较为分散地分布在沟谷两侧。耕地与塘坝分布总体上呈现出一定的适应性关系, 主要表现在如下几个方面。(1) 小塘坝分布分散, 与土地利用分散

具有适应性。(2) 小塘坝一般位于高位, 供水不稳定, 因此位于上部的农作物更易受到旱灾的影响, 而下冲田则更稳产。因此位于高位的水田总体较少, 水田主要位于谷地的中下部, 与较大型塘坝分布相适应。在调查中发现, 在研究区有少数几处水田因为灌溉得不到保障, 已经转化为林地或旱地。(3) 在研究区, 谷地既适合开垦为水田, 也适合修建塘坝, 为了更充分地利用水资源, 故大的塘坝一般均分布在地形上稍靠近上部的位置, 以利于灌溉更多的水田。(4) 耕地类型随距离塘坝的远近发生变化(见 2.4 耕地类型与塘坝分布关系)。因此, 耕地的分布总体上与塘坝分布具有密切的联系。

1997 年以来, 安徽省在江淮丘陵地区实施了“江淮分水岭易旱地区综合治理工程”, 并根据该区域自然条件 and 生产特征, 开展了“四把一促”(即把水留住、把树种上、把路修通、把结构调优, 促进农民增收)工程<sup>[18]</sup>, 通过生态环境治理工程的开展, 对改善该区域生产生活条件、促进区域经济发展起到了积极作用。在生态环境治理方面的主要内容是通过修建塘坝, 增大水面率和塘坝容量; 通过种树造林, 加大林地覆盖率, 改善生态、涵养水源; 调整水稻种植比例, 变水田为旱地、园林、林地, 降低对水资源的依赖。

根据上述工程经验, 结合野外考察结果, 本文认为水的问题是制约该区域土地利用的核心问题。从水的输入、存储、输出角度考虑, 本文认为塘坝与土地利用格局适应性测度可考虑三个主要参数, 即区域的水面率( $R_w$ , 即水域面积与区域总面积之比, 反映水的汇集与存储)、耕地面积所占比例( $R_c$ , 反映对水的需求)、林地面积比例( $R_f$ , 反映水的输入与涵养)。一定区域的水面率是区域自然生态环境特征的一个重要表现, 是区域生态系统协调发展的结果, 同时也是保障社会经济可持续发展的一个重要参数<sup>[28]</sup>。水域面积与其他类型土地利用面积之间的比例关系表征着一个区域的土地利用结构特征。从塘坝系统的适应性维度看, 该比例关系具有重要的意义。首先, 水域面积与耕地之间的比例关系直接反映水资源的供需关系; 其次, 林地具有涵养水源的功能。在本研究区, 林地基本都成为大大小小塘坝的集水区。因此林地的面积占比可以影响到塘坝对径流的拦蓄能力及供水能力。

在上述参数分析的基础上, 构建了塘坝与土地利用适应性指数( $P$ ), 计算公式如下:

$$P = R_w \times W_w + R_c \times W_c + R_f \times W_f \quad (3)$$

式中:  $P$  为塘坝与土地利用适应性指数;  $R_c$ 、 $R_w$ 、 $R_f$

分别为耕地面积比例、水面率、林地面积比例;  $W_w$ 、 $W_c$  和  $W_f$  分别为三者的权重。  $R_c$ 、 $R_w$ 、 $R_f$  三个参数间如达到了合适的比例关系, 即可认为该区域实现了水土资源的高效利用。

结合研究区域的实地调查, 样区 1 塘坝基本可以保障区域耕地对水资源的需求, 而其林地比例达 53.5%, 因此将  $P$  中  $W_f$  权重确定为 0.6, 耕地比例和水面率视为同等重要,  $W_w$  和  $W_c$  分别给予 0.2 权重, 这样  $P$  的取值在 0.2~0.6 之间, 取中值 0.4 视为适宜, 与 0.4 相差越大, 适宜性越差。计算结果见表 5。

表 5 研究样区塘坝与土地利用适应性指数计算

Tab. 5 Calculation of the pond and land use adaptability index

研究区域	$R_c$	$R_f$	$R_w$	$P$	$HD_L$
样区 1	0.347	0.535	0.051	0.4006	0.9985
样区 2	0.378	0.27	0.028	0.2432	0.6080

由表 5 可见, 样区 1 的塘坝与土地利用适应性指数  $P$  为 0.4006, 塘坝与林地和耕地适宜性较好, 这也与样区实际调查情况相吻合, 塘坝基本可以保障耕地用水。而样区 2 的  $P$  值只有 0.2432, 区域塘坝与土地利用类型适宜性较差。在实地调查中也发现, 样区 2 及周边区域与样区 1 非常明显的差别就是林地比例很低, 尤其是岭脊线附近, 林地甚至被大量旱地所取代, 导致  $P$  值明显偏低。

进一步参考左其亨<sup>[24,25]</sup>人水和谐论和谐度方程, 将  $P$  作为塘坝与耕地、水面和林地三要素的综合和谐度, 将其标准化至 [0, 1] 范围, 得到塘坝与土地利用的和谐度  $HD_L$  (见表 5)。由表 5 可见, 样区 1 塘坝与土地利用的和谐度  $HD_L$  为 0.9985, 样区 2 为 0.6080, 与本文计算的适应性指数 ( $P$ ) 结果基本一致。

### 2.5.3 水资源供需的适应性机制与测度

塘坝修建的基本目的是满足农业生产的需要, 因此塘坝的水资源供需适应性机制与测度是研究塘坝系统适应性的最重要方面。

从机制层面, 供需的适应性涉及供给和需求两个方面。水资源供给能力取决于塘坝的容量、降水的总量及时程分配 (与农作物不同生长阶段的水资源需求的匹配)。而水资源需求则取决于农作物的种类及耕作方式。由于本区域塘坝容量均较小, 不具备人为调控的条件, 因此塘坝修建后, 其供水能力完全决定于塘坝自身的条件 (容量、集水区域) 以及降水特征 (降水量及时程分配)。而需求方面, 长期以来本地居民已形成了既定的生产方式, 并形成了

对水资源的稳定需求。此外, 本研究区地下水资源缺乏, 农村居民的生活用水以及农业加工、养殖等产业也主要依赖于塘坝的供水。

从测度层面, 本文认为研究区塘坝水资源供需适应性特征可由水资源供需比 ( $R$ ) 来表征, 即:  $R = Q_s / Q_d$ , 式中,  $Q_s$ 、 $Q_d$  为水资源供水量与需水量。从供水角度看, 塘坝的供水能力不仅取决于其容量, 还取决于其复蓄能力。而复蓄能力又取决于降水条件和集水区自然条件 (蒸发、地下水补给)。综合考虑现有的研究结果, 金菊良等<sup>[23]</sup>认为, 江淮丘陵区在频率 85% 年降水量情景下, 塘坝复蓄次数可按 1.15 计算。从需水角度看, 需要考虑到农业生产、居民生活及加工、养殖等的综合需水情况。在农业生产方面, 可以根据水田、旱地作物的需水量计算得到农业综合灌溉需水量<sup>[23]</sup>。而居民生活及加工、养殖等的需水则需要结合实际调查与经验进行综合统计分析。综合考虑上述方面, 可将水资源供需测度计算参数列表 6 进行计算。

表 6 水资源供需测度计算参数

Tab. 6 Parameters for measurement of water supply and demand

一级指标	二级指标	计算方法
塘坝可供水量	塘坝面积, 容量	实地测量、调查
	供水能力	经验法、理论法
需水量	农业综合灌溉需水量	水田、旱地作物需水量计算
	居民生产生活需水量	调查统计分析

根据上述计算办法, 对本文研究样区水资源供需比进行了计算。

两个研究区样区内无河流分布, 地下水资源也缺乏, 因此所需水资源均依赖于塘坝的供给。研究区塘坝主要满足耕地的灌溉需求, 因此下面仅对本区域的塘坝供水与耕地灌溉需求的关系进行计算分析。农业需水量的计算借鉴金菊良等<sup>[23]</sup>以水旱比和复种指数构建的塘坝灌区耕地综合灌溉需水量计算公式:

$$M = A \times M_{\text{平均}} \times f, \text{ 其中 } M_{\text{平均}} = \frac{M_{\text{水}} \times \alpha \times M_{\text{旱}}}{1 + \alpha} \quad (4)$$

式中:  $M$  为耕地综合灌溉需水量 ( $\text{m}^3$ );  $A$  为塘坝灌溉耕地面积 ( $\text{hm}^2$ );  $f$  为复种指数, 取 2;  $\alpha$  为水旱比;  $M_{\text{水}}$  和  $M_{\text{旱}}$  分别为水田和旱地单季每公顷耕地灌溉需水量 ( $\text{m}^3$ ), 滁州地区保证率  $p = 85\%$  的取值为  $3.860 \text{ m}^3$  和  $1.148 \text{ m}^3$ 。

结合实地测量, 运用上述公式计算研究区水资源供需见表 7。

表 7 研究样区耕地水资源供需关系

Tab. 7 Relationship between water supply and demand for cultivated land

研究区域	复蓄库容/ $m^3$	耕地面积/ $hm^2$	水旱比	$M_{平均}/(m^3 \cdot hm^{-2})$	耕地综合灌溉需水量/ $m^3$	供需比( $Q_s/Q_d$ )	$HD_w$
样区 1	172 236.88	31.80	1.26	2 660.06	169 182.12	1.02	0.880 7
样区 2	111 763.00	47.92	0.45	1 992.98	190 993.06	0.59	0.144 8

可见,样区 1 供需比为 1.02,在  $p=85\%$  年降水量情景下,基本满足耕地的灌溉需求,与实地情况相吻合。而样区 2 水资源供需比  $R$  仅为 0.59,塘坝供水能力与实际耕地需求相差较大,这也印证了野外现场调查中当地人们反映的样区 2 几乎年年出现干旱的基本状况。

参考左其亭<sup>[24-25]</sup>人水和谐论和谐度方程,将塘坝与耕地水资源供需和谐度方程定义为

$$HD_w = a_i - b_j \quad (5)$$

式中: $a$  为塘坝供水量/耕地需水量; $b$  为供需差额/耕地需水量,满足  $a+b=1$ , $i$  和  $j$  均在  $[0, 1]$ ,  $HD_w$  也在  $[0, 1]$ 。在保证率  $p=85\%$  情景下, $i$  和  $j$  取值均为 0.85,计算得两样区结果见表 7。

由表 7 可见,样区 1 塘坝与耕地水资源供需和谐度为 0.880 7,样区 2 为 0.144 8。和谐度计算结果与供需比在定性的结论上一致,但在具体的数量比较上存在差异,样区 1 与样区 2 的供需比  $R$  的比值(1.02/0.59,为 1.73)大大小于和谐度比值(0.8807/0.1448,为 6.08)。本文的供需比是根据水资源利用的实际过程参数计算得到的,因此其结果应该更符合实际。

## 3 讨论

### 3.1 江淮丘陵区塘坝适应性机制综合分析

综合上述分析,可以发现,塘坝、耕地、地形三者之间形成了相互制约和适应的特征(图 5)。具体表现在如下方面。(1) 区塘坝系统形成的基本动力在于耕地对灌溉的需求,耕地和塘坝间有着相互制约和适应的特征。由于研究区地形起伏不平,地形较平缓的区域既适合开垦为耕地,也适宜于修建塘坝,因此在空间上二者呈现此消彼长的关系。二者之间的比例关系取决于水资源的供需特征。(2) 研究区塘坝系统形成的基本制约因素为地形因素。地形对塘坝的大小、空间分布都具有制约作用,同时也制约着对耕地布局。在地形因素的制约下,塘坝和耕地都表现出对地形因素的适应性。(3) 耕地的数量和结构、塘坝的数量特征以及二者比例关系受制于降水和地形条件,并为之形成了适应与耦合关系<sup>[19]</sup>。

从人水(地)和谐角度看,人的生产生活对水的

需求是塘坝形成的动力因素,而区域的地形和降水条件是背景和制约因素。研究区塘坝系统的形成是人们因地制宜改造和利用自然的结果。

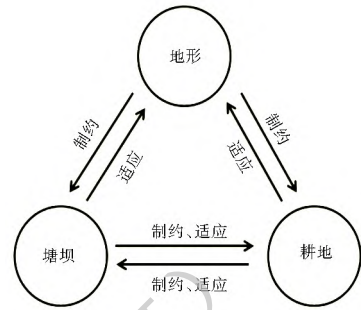


图 5 塘坝、耕地、地形适应性关系

Fig. 5 Adaptation of pond, farmland, and terrain

### 3.2 研究区塘坝适应性测度分析与讨论

在考察研究区塘坝的适应性机制的基础上,选择了塘坝分布与地形的适应性测度(塘坝地形权重指数  $W$ )、土地利用与塘坝分布的适应性测度(土地利用适应性指数  $P$ )、水资源供需适应性测度(供需比  $R$ )三个指标对研究区塘坝适应性测度进行了定量分析。对比构建的测度指标与两个研究样区的实际以及利用和谐度方程计算结果<sup>[24-25]</sup>,笔者认为塘坝分布与地形的适应性测度、土地利用与塘坝分布的适应性测度两个指标具有物理机制上的合理性,同时也具有描述自然现象的适宜性,可以用于类似问题中难以量化分析的问题。但由于本文选择的样区较少,面积也较小,因此其合理性还有待进一步的深入检验。

构建的塘坝水资源供需的适应性测度,是基于前人的研究,对研究区进行深入调查基础上而形成的,该指标对于小流域的治理具有较好的参考价值。未来将进一步结合不同区域,分析计算不同年降水量情景下,塘坝供水与耕地需水的平衡分析,以使其更有实际指导价值。

构建的反映塘坝适应性的三个测度指标是从三个不同角度考虑而形成的。理想状况下,可以构建一个统一的指标来具体表征塘坝的适应性。但由于对研究区塘坝适应性机理理解还不够,本文尚未能构建出这样一个统一的指标。这也是下一步的努力方向。

## 4 结论

本文从人水和谐角度,在探讨水适应性的内涵和研究意义的基础上,以安徽省江淮丘陵两个小流域为研究样区,对该区域塘坝的分布特征及其与地形、土地利用、水资源供需关系的适应性机制进行了探讨,提出了要素间适应性测度指标及计算方法,得到如下结论。

(1)两个研究样区内林草地为主要的土地利用类型,面积占比均超过50%,耕地约占35%,塘坝仅占约2.82%~5.8%,水面率偏小。

(2)研究区塘坝和耕地分布具有规律性。塘坝在不同海拔高度的分布差异明显,在空间上呈现“串珠状”展布,地形位置高的塘坝占有明显的优势地位。耕地围绕塘坝展布,并与沟谷延伸方向一致。耕地类型随距离塘坝的远近发生变化。塘坝、耕地、地形三者之间形成了相互制约和适应的特征。生产生活对水的需求是塘坝形成的源动力,而区域地形和降水条件则为背景和制约因素。研究区塘坝系统的形成是人们因地制宜改造和利用自然的结果。

(3)从塘坝形成的自然过程及水资源供需角度,本文构建了塘坝分布地形权重指数( $W$ )、塘坝与土地利用适应性指数( $P$ )、塘坝水资源供需适应性指数( $R$ )等指数,以定量研究塘坝系统水适应性机制与测度。适应性指数 $P$ 与 $R$ 在研究区塘坝表现出较好的吻合性,可以反映塘坝系统水适应性的实际,但仍需进一步研究的检验。

### 参考文献(References):

- [1] 方一平,秦大河,丁永建.气候变化适应性研究综述—现状与趋向[J].干旱区研究,2009,26(3):299-305.(FANG YP, QIN D H, DING Y J DING Y J. A review about the research on adaptability in climate change present situation and tendency[J]. Journal of Arid Land, 2009, 26(3): 299-305. (in Chinese)) DOI: 10.13866/j.azr.2009.03.006.
- [2] PAHL-WOSTL C. Requirements for adaptive water management. in: Pahl-Wostl C., Kabat P., M Ötgen J. (eds) Adaptive and Integrated Water Management[M]. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-75941-6\_1.
- [3] PAHL-WOSTL C. Transition towards adaptive management of water facing climate and global change[J]. Water Resources Management, 2007, 21(1): 49-62. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5591-4.
- [4] 曹建廷.水资源适应性管理及其应用[J].中国水利,2015(17): 28-31.(CAO J T. Adaptive management of water resources and its application[J]. China Water Resources, 2015(17): 28-31. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2015.17.011.
- [5] 左其享.水资源适应性利用理论及其在治水实践中的应用前景[J].南水北调与水利科技,2017,15(1): 18-24.(ZUO Q T. Theory of adaptive utilization of water resources and its application prospect in water management practices[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1): 18-24. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsrtdqk.2017.01.004.
- [6] GEORGAKAKOS A P, YAO H, KISTENMACHER M, et al. Value of adaptive water resources management in Northern California under climatic variability and change: reservoir management[J]. Journal of Hydrology, 2012, 412: 34-46. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.04.038.
- [7] 左其享.水资源适应性利用理论的应用规则与关键问题.干旱区地理,2017,40(5): 925-932.(ZUO Q T, Application rules and key issues in theory of adaptive utilization of water resources. Arid land geography, 2017, 40(5): 925-932. (in Chinese)) DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2017.05.001.
- [8] ENGLE N L, JOHNS O R, LEMOS M, et al. Integrated and adaptive management of water resources: tensions, legacies, and the next best thing[J]. Ecology and Society, 2011, 16(1): 19. DOI: 10.5751/es-03934-160119.
- [9] FRITSCH O. Integrated and adaptive water resources management: exploring public participation in the UK. Regional Environmental Change, 2017, 17(7): 1933-1944. DOI: 10.1007/s10113-016-0973-8.
- [10] 俞孔坚,姜芊孜,王志芳,等. 塘塘景观研究进展与评述[J]. 地域研究与开发,2015,34(3): 130-136.(YU K J, JIANG Q Z, WANG Z F, et al. The research progress and prospect of Beitang landscape[J]. Areal Research and Development, 2015, 34(3): 130-136. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1003-2363.2015.03.023.
- [11] 刘涓,张仕超,魏朝富.西南丘陵山区塘堰系统对农田水量平衡的局地调控作用[J].水资源与水工程学报,2010,21(3): 43-48.(LIU J, ZHANG S C, WEI C F. Local regulative function of multi-pond system for the field water budget in hilly mountainous region of Southwestem China[J]. Journal of Water Resources and Engineering, 2010, 21(3): 43-48. (in Chinese))
- [12] 蔡学良,崔远来,董斌,等.基于GIS的南方水库灌区塘堰蓄水能力研究[J].中国农村水利水电,2006(10): 1-4.(CAI X L, CUI Y L, DONG B, et al. Research on ponds water storage capacity of reservoir irrigated district in Southern China based on GIS[J]. China Rural Water and Hydro power, 2006(10): 1-4. (in Chinese))
- [13] GAO J, WANG R, HUANG J. Ecological engineering for traditional Chinese agriculture rearing for Tradition Beitang[J]. Ecological Engineering, 2015, 76(1): 7-13. DOI: 10.1016/j.ecoeng.2014.06.035.
- [14] MCDONALD C P, ROVER J A, STETS E G, et al. The regional abundance and size distribution of lakes and reservoirs in the United States and implications for estimates of global



- lake extent[J]. *Limnology and oceanography*, 2012, 57: 597-606. DOI: 10.4319/lo.2012.57.2.0597.
- [15] 程文辉,王谨谨,曲强,等.我国塘坝窖池工程现状分析[J].*中国水利*,2013(7):16-17.(CHENG W H,WANG J J,QU Q, et al. Analysis on the current situation of pond collar in China[J]. *China Water Resources*, 2013(7): 16-17. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2013.07.009.
- [16] 惠富平,黄富成.汉代江淮地区陂塘水利发展及其环境效益[J].*中国农史*,2007(2):3-8.(HUI FP,HUANG FC. The Development of pond irrigation works and its environmental effects in Jianghuai region in the Han Dynasty[J]. *History of Agriculture in China*, 2007(2): 3-8. (in Chinese))
- [17] 梁修存,杨祎,丁登山,魏守华.皖西江淮分水岭易旱区旱灾机制及对策研究[J].*水土保持通报*,2002,22(5):61-65.(LIANG X C,YANG Y,DING D S, et al. Analysis on Drought Mechanism and Countermeasures in Jianghuai Watershed of Western Anhui Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2002, 22(5): 61-65. (in Chinese)) DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2002.05.017.
- [18] 樊明怀,周云峰,夏兴萍,等.安徽省江淮分水岭地区综合治理的思路和对策[J].*中国农业资源与区划*,2008,19(4):22-26.(FAN M H,ZHOU Y F,XIA X P, et al. Thoughts and countermeasures about the comprehensive harnessing of the watershed region between the Yangtze River and Huahe River of Anhui province[J]. *Journal of China Agricultural Resources and Regional Planning*, 2008, 19(4): 22-26. (in Chinese))
- [19] 俞孔坚,陈义勇.国外传统农业水适应经验及水适应景观[J].*中国水利*,2014(3):13-16.(YU K J,CHEN Y Y. Research progress on traditional agricultural water adaptive landscapes in abroad[J]. *China Water Resources*, 2014(3): 13-16. (in Chinese))
- [20] 毛战坡,彭文启,尹澄清,等.非点源污染物在多水塘系统中的流失特征研究[J].*农业环境科学学报*,2004,23(3):530-535.(MAO Z P,PENG C Q,YIN C Q, et al. Spatial variability of non point source pollutants within a multi pond system[J]. *Journal of Agro Environment Science*, 2004, 23(3): 530-535. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:1672-2043.2004.03.027
- [21] 毛战坡,尹澄清,单宝庆.水塘系统对农业流域水资源调控的定量化研究[J].*水利学报*,2003(12):76-83.(MAO Z P,YIN C Q,SHAN B Q. Regulation function of multi pond system for water resources in a watershed[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003 (12): 76-83. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2003.12.012.
- [22] 王庆.江淮丘陵易旱地区塘坝系统供水量的计算研究[D].合肥:合肥工业大学,2012.(WANG Q. Research on the Calculation of Available Water Supply of The Pond System in Area of Jianghuai Rolling [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [23] 金菊良,原晨阳,蒋尚明,等.基于水量供需平衡分析的江淮丘陵地区塘坝灌区抗旱能力评价[J].*水利学报*,2013,44(05):534-541.(JIN J L,YU AN C Y,JIANG S M, et al. Assessment of drought resistance ability for pond and retaining dam irrigated area of Jianghuai hilly area based on water supply and demand balance analysis[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44 (05): 534-541. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2013.05.014.
- [24] 左其亭,毛翠翠.人水关系的和谐论研究.中国科学院院刊,2012,27(4):469-477.(ZUO Q T,MAO C C. Research on the Harmony Theory Method of Human water Relationship. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2012, 27(4): 469-477. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2012.04.010.
- [25] 左其亭.和谐度方程在水文水资源领域应用展望[J].*水资源研究*,2016,5(2):101-107.(ZUO Q T. Application prospect of harmony degree equation in the field of hydrology and water resources[J]. *Journal of Water Resources Research*, 2016, 5(2): 101-107. (in Chinese))
- [26] 王友贞,叶乃杰.江淮丘陵易旱地区适宜水旱种植比的研究[J].*水土保持研究*,2003,10(4):159-161.(WANG Y Z,YE N J. Study on suitable proportion of the paddy field and dry farming grow in the drought area of Jianghuai Rolling[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2003, 10(4): 159-161. (in Chinese))
- [27] 芮孝芳.水文学原理[M].北京:中国水利水电出版社,2004.(RU X F. Principles of Hydrology[M]. Beijing: Press of China Water Conservancy and Hydro power, 2004. (in Chinese))
- [28] 王淑英,高永胜,叶碎高,等.合理水面率的研究方法与框架初探[J].*水利学报*,2007(S1):568-572.(WANG S Y,GAO Y S,YE S G, et al. Approach research for ratio of reasonable water surface [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007 (S1): 568-572. (in Chinese))
- [29] 邓伟,戴尔阜,贾仰文,等.山地水土要素时空耦合特征、效应及其调控[J].*山地学报*,2015,33(5):513-520.(DENG W,DAI E F,JIA Y W, et al. Spatio-temporal coupling characteristics, effects and their regulation of water and soil elements in mountainous Area[J]. *Journal of Mountain Sciences*, 2015, 33 (5): 513-520. (in Chinese)) DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000064.