

塔里木河流域水资源系统脆弱性定量评价研究

宁理科^{1,2}, 刘海隆¹, 包安明²

(1. 石河子大学 水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832003; 2. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 针对干旱区内陆河流域水循环过程的特点, 结合该区水资源系统脆弱性研究现状, 从水资源供需平衡角度分析了干旱区内陆河流域水资源系统脆弱性的概念与内涵, 提出了相应的定量评估方法。以塔里木河盆地 30 个县市为例构建合适的指标体系, 开展了水资源系统脆弱性的定量研究。结果显示, 研究区各县域供、需水脆弱性差异较大, 有 90% 的县域需、供水脆弱性指数比大于 1, 存在较为明显的供需矛盾; 有 80% 的县域存在脆弱性问题, 空间分布与实际情况比较吻合。研究表明, 该方法和指标体系能很好地反映研究区水资源系统脆弱性的现状, 对干旱区内陆河流域水资源管理和调控具有重要的指导意义。

关键词: 水资源系统; 脆弱性指数; 干旱区; 内陆河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)05-0266-05

中图分类号: TV213

Quantitative Study of Water Resources System Vulnerability in Tarim River Basin

NING Li-ke^{1,2}, LIU Hai-long¹, BAO An-ming²

(1. *Water Resources and Architectural Engineering College, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China*; 2. *Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China*)

Abstract: Vulnerability of water resources system is essential to regional water management and economic development in arid inland regions. The purpose of this study was to explain the meaning of water resources system vulnerability in arid inland regions and explore the vulnerability quantitatively. First, a concept of vulnerability is analyzed based on the current researches, expressing the characteristics of water resources system in arid inland regions. A methodology to quantify the vulnerability is presented subsequently by a multi-criteria analysis approach. At last, the Tarim basin is selected as the representative area of arid inland regions based on the data available and experts' opinions. And the methodology is evaluated in the study area. Results show that 80% of the area is of vulnerability with high spatial variability. In addition, 90% of the area has a conflicting relation between water supply and demand. Moreover, the results are in accordance with the actuality, which indicates that the methodology presented is valuable for water resources management and regulation. This study can provide a theoretical basis for the researches on water resources system adaptability coping with climate change.

Keywords: water resources system; vulnerability index; arid regions; inland basin

水资源系统脆弱性研究是开展流域水资源规划和管理的基礎, 已成为应对气候变化、保障水资源安全重点关注的问题^[1]。从国内外对水资源系统脆弱性的研究内容来看, 大多数研究集中在气候变化对水资源脆弱性的影响上, 如王国庆等^[2]研究了我国淡水资源在气候变化情景下的脆弱性; 唐国平等^[3]提出了

构建了全球变化下水资源脆弱性的评估方法; Döll^[4]从人为和自然两个系统入手研究了气候变化下地下水资源的脆弱性; Farley 等^[5]考虑政策影响研究了气候变化下供水系统脆弱性的影响。另外, Hamouda 等^[6]将脆弱性作为系统属性分别从社会经济、基础设施、生态等角度研究了水资源系统脆弱性。但是这些

收稿日期: 2012-11-25

修回日期: 2013-01-13

资助项目: 国家重点基础研究发展计划项目“气候变化对西北干旱区水循环影响机理与水资源安全研究”(2010CB951004); 国家自然科学基金重点项目“干旱区地形地貌对降水的时空分布影响研究: 以开都河流域为例”(41161013); 石河子大学团队创新项目“内陆河流域水资源脆弱性演化机制研究”(2011ZRKXTD-03)

作者简介: 宁理科(1986—), 男(汉族), 河南省漯河市, 硕士, 从事水文水资源研究。E-mail: likening@outlook.com。

通信作者: 刘海隆(1974—), 男(汉族), 四川省德阳市, 副教授, 从事水文水资源及地理信息系统与遥感应用研究。E-mail: liu_hai_tiger@163.com。

研究很少考虑水资源供给、需求和管理等诸多因素,因此,对水资源脆弱性的形成过程与机理研究不够,尤其是对于内陆河流域这样缺水严重的地区,难以解释水资源系统脆弱性的本质,无法满足水资源优化配置和高效利用的需要。

在由来水—供水—用水—耗水—排水形成的内陆河流域水系统中,来水和耗水发生大幅变化时,平衡的供水—用水系统很容易被彻底倾覆,造成重大损失。研究表明,我国西北干旱区多个省区的水资源脆弱性将进一步加剧^[2],而减小水资源系统脆弱性是应对未来变化的第一步^[7]。因此,研究干旱区内陆河流域水资源系统脆弱性是十分必要的。

此外,水资源系统脆弱性的定义尚不统一^[8],如秦大河等^[9]从气候变化和人类活动影响的角度出发,认为水资源系统脆弱性是气候变化对水资源可能造成损害的程度;Liu^[10]则认为水资源系统脆弱性应该由水资源对气候变化的敏感性来反映;刘绿柳^[11]从地下水脆弱性引申,认为水资源系统脆弱性是水资源系统易遭受人类活动、自然灾害威胁和损失的性质和状态,受损后难于恢复到原来状态和功能的性质。

Luers^[12]认为脆弱性评估之前需要明确脆弱性的概念。陈亚宁等^[13]指出干旱区内陆河流域水问题研究的重点是山区来水与流域内生活、生产与生态需水的内在联系以及流域水系统中供需水依赖关系。因此,笔者认为干旱区内陆河流域水资源系统脆弱性是指以供需水为核心的水资源系统在发展过程中,受到不同的自然、社会系统的内在特征、资源条件和法规体系影响,维持自身稳定性的能力。干旱区内陆河流域水资源系统脆弱性以供需水为核心进行定义,当供需水的各个方面在系统内在特征变化和法规体系的影响下,系统不能维持正常的供需水关系时,脆弱性就会以农业灾害、土壤退化、生态恶化等不良后果的形式表现出来。其次,脆弱性是干旱区内陆河流域水资源系统的固有属性,随系统的变化而变化,是动态的,具有时间尺度,并且脆弱性在干旱区内陆河流域随区域位置发生变化,具有空间尺度。最后,干旱区内陆河流域水资源系统脆弱性存在一个阈值,当超过该阈值时,系统遭到破坏,可能转化为另外一种系统,并且该转化在短时间内具有不可逆性。

本文拟选择典型的干旱区内陆河流域塔里木河流域为研究对象,结合干旱区内陆河流域水资源系统的特点,提出定量表达干旱区水资源系统脆弱性的方法,并构建合理的指标体系,展开流域水资源系统脆弱性定量评估。

1 研究区概况及数据来源

塔里木流域是一个封闭的内陆水循环和水均衡的水文区域,自西向东绕塔克拉玛干大沙漠,贯穿地处天山山脉南侧和昆仑山北麓的塔里木盆地。流域内分布有五地州 42 个县市,包括新疆生产建设兵团 4 个师的 55 个团场,流域面积 $1.02 \times 10^6 \text{ km}^2$ (包括沙漠面积)。流域多年平均地表水天然径流量 $3.98 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中冰川融水量占出山口径流量的 40% 左右^[14],绿洲耗水量约为 $2.21 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[15]。径流年内分配不均,6—9 月来水量在全年径流量中的比重超过 70%。并且干流来水量约以 $8 \times 10^8 \sim 1.0 \times 10^9 \text{ m}^3$ /年减少,源流区耗水量约以 $5.5 \times 10^7 \text{ m}^3$ /年增加^[16]。同时,研究区内各县市水资源分布不均,人口密度空间分布差异较大,经济发展不平衡,水资源开发利用已突破西北干旱区 70% 的合理开发利用率,高达 79%^[17]。

本文以塔里木河流域县域为基本研究单元,开展干旱区内陆河流域水资源系统脆弱性的定量评价研究。数据来源于 2011 年巴音郭楞蒙古自治州统计年鉴、和田地区统计年鉴、阿克苏地区统计年鉴和喀什地区统计年鉴,考虑到数据的一致性,本文选择塔里木河流域 30 个县市作为研究对象,

2 研究方法

2.1 水资源脆弱性指数

本文针对干旱区内陆河流域水循环过程的特点,根据干旱区内陆河流域水资源系统脆弱性的概念和内涵,提出一个表示区域水资源系统脆弱性的综合指标——水资源脆弱性指数。该指标由供水脆弱性和需水脆弱性组成,即反映水资源系统本身脆弱性和用水者附加脆弱性。依据多准则分析方法,水资源系统脆弱性指数 (WSVI) 由供水脆弱性 (SDWV) 和需水脆弱性 (DDWV) 综合而成:

$$WVI = \alpha * SDWV + \beta * DDWV \quad (\alpha + \beta = 1) \quad (1)$$

式(1)中供水脆弱性和需水脆弱性指数采用综合指数加权求和模型求得:

$$SDWV = \sum_{i=1}^n r_i C_i, \quad DDWV = \sum_{i=1}^n r_i C_i \quad (2)$$

式中: C ——选择的计算指标; r ——相应指标的权重。计算过程中可能采用的指标主要从流域供需水角度考虑,供水主要包括正常水资源、极端事件供水以及水存储,需水脆弱性主要包括生活用水、工业、农业和生态蓄水等,最终根据研究区的情况及专家意见和数据的可用性对指标进行选取、确定。本文中 α, β 均取为 0.5。

2.2 指标选择及权重确定

根据数据可用性和专家意见,最终确定 9 个指标进行 2010 年研究区水资源系统脆弱性的计算。为消除国土面积大小和人口多少的差别,本文部分指标采用人均量以便比较(表 1)。其中灌溉面积百分比表示有效灌溉面积与国土面积的比值;森林覆盖率表示

森林面积与国土面积的比值,森林覆盖率越大,表示生态需水量越多。人均农业生产总值和人均工业生产总值作为经济指标,反映经济发展水平,经济发展水平越高,水资源的消耗越大。本文中由于缺少详细的地下水数据,因此假设各县的地下水开采均在可开采范围之内,并采用机电井装机容量代表地下水开采量。

表 1 最终确定水资源系统脆弱性指标及数据来源

供水脆弱性数据集(指标)	数据源	需水脆弱性数据集(指标)	数据源
年均降水量(M)	气象部门	人口密度(P)	统计年鉴
融雪期平均气温(T)	气象部门	灌溉面积百分比(A)	农业部门
机电井装机容量(R)	统计年鉴	森林覆盖率(F)	气象部门
人均库容(C)	水利部门	人均农业生产总值(N)	统计年鉴
		人均工业生产总值(G)	统计年鉴

指标权重反映各指标对水资源系统脆弱性的影响程度。本文中各指标权重采用层次分析法(AHP)确定,该方法已被广泛用于脆弱性以及区域水资源系统评价理论中权重确定^[18-20]。具体计算方法见文献[21]。经计算得到各指标的权重(见表 2),且均通过一致性检验。

由于各个指标量级和量纲不一致,因此本文引入模糊数学的中的隶属函数概念进行无量纲化:

$$F = \frac{x_i - (x_1 : x_n)}{(x_1 : x_n)} \quad (3)$$

式中:F——无量纲编码; x_i ——指标取值($i=1, 2, \dots, n$); $(x_1 : x_n)$ ——指标的平均值。

表 2 各水资源系统脆弱性指标权重

r_m	r_r	r_t	r_c	r_p	r_a	r_f	r_n	r_g
0.18	0.27	0.25	0.31	0.19	0.27	0.15	0.24	0.15

3 结果与分析

3.1 供需水脆弱性分析

根据多准则分析方法,按照式(2)分别计算研究区各县域供水脆弱性指数和需水脆弱性指数(如图 1

所示)。图 1 中供、需水脆弱性均随脆弱性指数增大而加剧。

相关分析表明,供、需水脆弱性指数的相关系数为 0.20,显著性水平为 0.281,说明二者之间并不存在明显的相关关系。

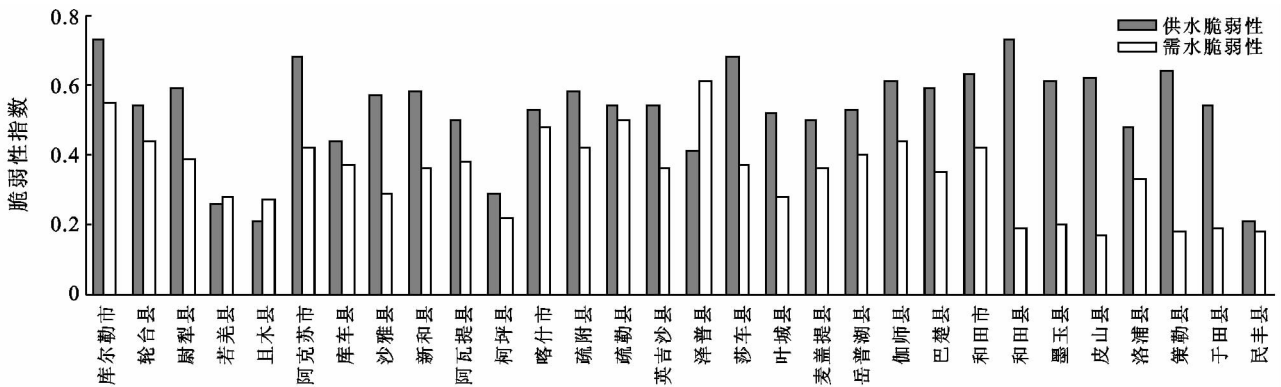


图 1 2010 年研究区供需水源脆弱性指数

就供水脆弱性而言,研究区内 30 个县域差异较为明显,存在 4 个较大值,分别为若羌县(0.74)、且末县(0.79)、柯坪县(0.71)和民丰县(0.79),比研究区

供水脆弱性指数均值高出 51% 以上,说明这 4 个县域水资源系统本身比较脆弱。另外,库尔勒市、阿克苏市、莎车县和和田县供水脆弱性指数较小,分别为

0.27, 0.32, 0.32 和 0.27, 约为研究区供水脆弱性指数均值的 41%~49%, 说明这 4 个县域供水脆弱性较为稳定。这一方面由县域的地理位置和气候条件决定, 如若羌县、且末县和民丰县均有区域位于塔克拉玛干大沙漠, 气候干燥, 降水稀少。另一方面是由于这 4 个县域缺乏相应的蓄水工程, 仅民丰县有小一型水库 1 座, 无法对河道来水进行合理的调节。

相对于供水脆弱性, 研究区内大部分县域的需水脆弱性指数高于供水脆弱性指数, 这说明研究区内需水导致的脆弱性普遍较高, 同时也说明研究区内用水者附加的脆弱性大于水资源系统本身的脆弱性。与供水脆弱性相同的是, 如若羌县、且末县、柯坪县和民丰县 4 个县域的需水脆弱性也较大, 分别为 0.72, 0.73, 0.78 和 0.82; 此外, 和田县、墨玉县、皮山县、策勒县和于田县 5 个县域的需水脆弱性指数分别为 0.81, 0.80, 0.83, 0.82 和 0.81, 比研究区需水脆弱性指数均值高出 10%~27%。

综上所述, 研究区 30 个县域供、需水脆弱性差异较为明显, 有 9 个县域供水脆弱性指数较大, 其中如若羌县、且末县、柯坪县和民丰县 4 个县域需水脆弱性指数也较大, 说明这 4 个县域水资源形势相对其他县域较为严峻; 并且有大部分县域需水脆弱性指数大于供水脆弱性指数, 说明用水者附加的脆弱性大于水资源系统本身的脆弱性。

3.2 水资源脆弱性组成及其分析

水资源系统脆弱性指数由供水脆弱性指数和需水脆弱性指数两部分构成, 按照式(1)可求得研究区各县域水资源系统脆弱性指数。研究区各县域的水资源系统脆弱性指数构成如图 2 所示。

由图 2 可知, 研究区各县水资源系统脆弱性指数变幅较大, 脆弱性指数最大值(民丰县, 0.81)约是最小值(库尔勒市, 0.27)的 3 倍; 并且供需水矛盾较为突出, 有 27 个县域需、供水脆弱性比大于 1, 约占研究区的 90%。

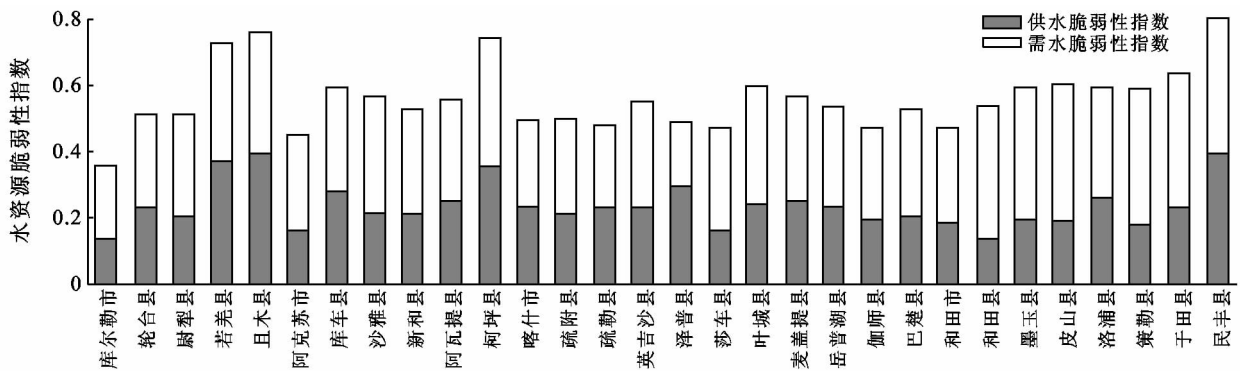


图 2 研究区水资源脆弱性指数及其构成

同时, 鉴于“自然间断点分类法”可使各类之间差异最大化, 对相似值进行最恰当的分组, 故本文采用该方法将水资源脆弱性指数计算结果分为 5 类, 并将各类分别定义为不脆弱(0.48 以下), 微脆弱(0.48~0.55), 中脆弱(0.55~0.60), 强脆弱(0.60~0.68)和极脆弱(0.68~0.81)。其中, 库尔勒市、阿克苏市、疏勒县、莎车县、伽师县和和田市分别为 0.36, 0.48, 0.48, 0.47, 0.48 和 0.48, 为不脆弱区, 但这 5 个县域除疏勒县外供、需水脆弱性相差较大, 需水脆弱性指数与供水脆弱性指数之比分别为 1.67, 1.44, 1.96, 1.56 和 1.81, 说明不脆弱区除疏勒县外的其他县域存在较为明显的供需水矛盾。另外, 中脆弱区和强脆弱区的若干县域, 如叶城县、墨玉县、皮山县、策勒县和于田县, 供需水矛盾同样尖锐, 需、供水脆弱性比分别为 1.52, 2.05, 2.17, 2.28 和 1.76。如果不采取恰当的措施减缓供需矛盾, 随着区域的发展和需水量的

增加, 以上县域水资源供需矛盾将进一步加剧, 水资源系统脆弱性可能会逐渐升级, 逐步演变为强脆弱区甚至极脆弱区。

如若羌、且末、柯坪和民丰 4 县水资源脆弱性指数分别为 0.68, 0.76, 0.75 和 0.81, 属于极脆弱区域, 尽管供需较为均衡, 需、供水脆弱性比分别为 0.96, 0.93, 1.10, 1.04, 同时由前分析可知, 这 4 个县域供水脆弱性指数和需水脆弱性指数均较大, 说明水资源问题比较严重, 需要通过修建水利工程措施、调整用水结构等措施降低水资源系统的脆弱性, 以防止水资源系统脆弱性进一步加剧。

综上所述, 研究区 30 个县域水资源系统脆弱性差异较为明显, 构成各不相同, 但基本上都是由高的需水脆弱性指数和较低的供水脆弱性指数组成, 都存在供需不和谐的现象, 供需水矛盾可能是造成研究区水资源系统脆弱性的重要原因。

3.3 水资源系统脆弱性评价

为分析研究区水资源系统脆弱性的空间分布,通过 ArcGIS 软件对研究区 30 个县域的水资源系统脆弱性进行空间分析,以更加清晰地比较研究区不同县域水资源系统脆弱性之间的差异(如附图 13 所示)。

附图 13 表明,2010 年研究区内只有 6 个县市表现为不脆弱,占研究区的 20%,有 4 个县市为极脆弱,大约为 13%,其他 3 类县市有 20 个,占研究区的 67%,呈现“两头小,中间大”的特征,即不脆弱和极脆弱两个极端类别所占比例较小,中间 3 类所占比例较大,说明研究区水资源脆弱性表现较为明显。

从水资源系统脆弱性指数的空间分布来看,研究区东北部、阿尔金山北部 4 个县水资源脆弱性较大,研究区北部、天山南坡各县水资源脆弱性较小,研究区西南部、昆仑山北侧水资源脆弱性变化较大,但总体脆弱性较小。即研究区“NE—WS”对角线大部分县域上水资源脆弱性较小,“NW—ES”对角线上柯坪县、阿瓦提县、民丰县、且末县和若羌县水资源较为脆弱。从流域尺度来说,塔里木河中下游区域,水资源脆弱性较大,源流区水资源脆弱性较小,与实际情况较为吻合,说明本研究提出的方法和选择的指标体系具有较高的可信度。究其原因,一方面是由于“NE—WS”对角线分别汇集了天山水系和昆仑山水系的水,分布着塔里木河的 4 个源头,即和田河、叶尔羌河、阿克苏河以及开孔河水系,水资源条件较好。另一方面“NE—WS”对角线是塔里木河流域人口和经济重心^[22],社会经济结构较为完善,工业化水平较高,水资源利用率高。

4 结论

(1) 干旱区内陆河流域水资源系统脆弱性是指以供需水为核心的水资源系统在发展过程中,受到不同的自然、社会系统的内在特征、资源条件和法规体系影响,维持自身稳定性的能力,并且脆弱性是干旱区内陆河流域水资源系统的固有属性,具有动态性、尺度性特点,而且具有阈值。

(2) 对研究区各县域供、需水脆弱性指数和水资源系统脆弱性的分析结果表明,研究区内约有 90% 的县域需水脆弱性高于供水脆弱性,即需、供水脆弱性指数比大于 1,并且有 30% 的县域需水脆弱性较为明显,同时,研究区内 30 个县市水资源系统脆弱性差异较大,80% 的县市水资源系统较为脆弱,说明研究区内水资源脆弱性较大,并且水资源系统供需矛盾较为突出,这可能是造成研究区水资源系统脆弱的主要原因。

(3) 结合 ArcGIS 软件平台对研究区内 30 个县市的水资源系统脆弱性进行空间分析,结果表明,研究区内水资源系统脆弱性分布呈现“两头小,中间大”的特征,即不脆弱区域和极脆弱区域所占比例较小,弱脆弱、中等脆弱和强脆弱区域所占比例较大,说明研究区内水资源系统脆弱性表现较为明显;研究区内脆弱性县域主要分布在“NW—ES”对角线上,整体的空间分布与实际情况较为吻合,说明结果较为合理。

本文结合干旱区水资源特点,提出干旱区水资源系统脆弱性的概念,并提出相应的计算方法以塔里木河流域为例进行定量评估,对干旱区内陆河流域水资源评价和水资源管理具有一定的应用价值和指导意义。

[参 考 文 献]

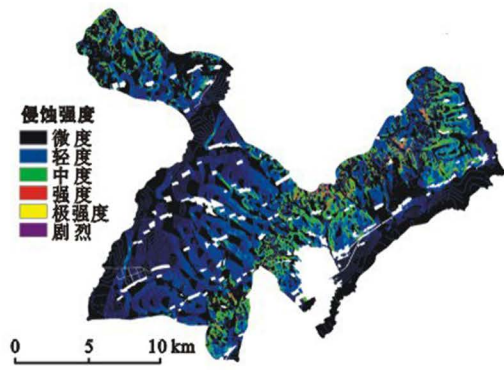
- [1] 夏军,刘春葵,任国玉. 气候变化对我国水资源影响研究面临的机遇与挑战[J]. 地球科学进展, 2011, 26(1): 1-12.
- [2] 王国庆,张建云,章四龙. 全球气候变化对中国淡水资源及其脆弱性影响研究综述[J]. 水资源与水工程学报, 2005(2): 7-10.
- [3] 唐国平,李秀彬,刘燕华. 全球气候变化下水资源脆弱性及其评估方法[J]. 地球科学进展, 2000, 15(3): 313-317.
- [4] Döll P. Vulnerability to the impact of climate change on renewable groundwater resources: A global-scale assessment[J]. Environmental Research Letters, 2009, 4(3): 035006.
- [5] Farley K A, Tague C, Grent G E. Vulnerability of water supply from the Oregon Cascades to changing climate: Linking science to users and policy[J]. Global Environmental Change: Human and Policy Dimensions, 2011, 21(1): 110-122.
- [6] Hamouda M A, El-din M M N, Moursy F I. Vulnerability assessment of water resources systems in the Eastern Nile Basin [J]. Water Resources Management, 2009, 23(13): 2697-2725.
- [7] Oki T, Kanai S. Global hydrological cycles and world water resources[J]. Science, 2006, 313(5790): 1068-1072.
- [8] 于翠松. 环境脆弱性研究进展综述[J]. 水电能源科学, 2007, 25(4): 23-27.
- [9] 秦大河,陈宜瑜,李学勇. 中国气候与环境演变(下卷): 气候与环境变化的影响与适应,减缓对策[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [10] Liu C. The vulnerability of water resources in Northwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(3): 309-314.

(下转第 304 页)

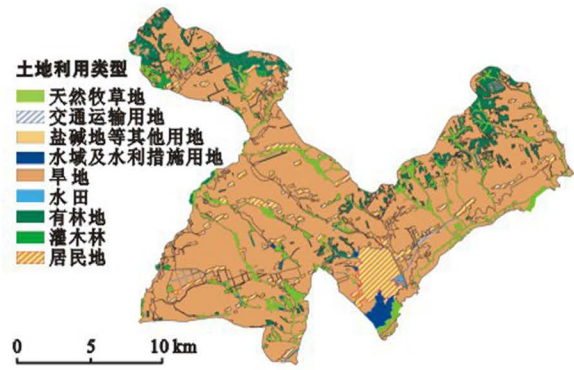
- 值的影响[J]. 中国沙漠, 2007, 27(1): 76-81.
- [15] 姚秋红, 袁戈丽. 新疆生态环境问题及保护对策[J]. 新疆教育学院学报, 2007, 23(2): 137-140.
- [16] 周华荣. 新疆生态环境质量评价指标体系研究[J]. 中国环境科学, 2000, 20(2): 150-153.
- [17] 刘建军, 李新琪, 高利军. 遥感技术在新疆生态环境监测与综合评价中的应用[J]. 干旱区地理, 2004, 27(4): 508-511.
- [18] 张飞, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建丽, 等. 塔里木盆地北缘绿洲土地利用与生态系统服务价值的时空变化研究[J]. 中国沙漠, 2009, 29(5): 933-941.
- [19] 田源, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建丽, 等. 新疆于田县耕地变化驱动力研究[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(3): 67-72.
- [20] 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.
- [21] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196.
- [22] 岳书平, 张树文, 闫业超. 东北样带土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J]. 地理学报, 2007, 62(8): 879-886.
- [23] Kreuter U P, Harris H G, Matlock M D, et al. Change in ecosystem service values in the San Antonio area, Texas [J]. Ecological Economics, 2001, 39(3): 333-346.
- [24] 李小燕. 区域生态系统服务价值量与环境压力分析: 以渭南市为例[J]. 干旱区研究, 2008, 25(5): 729-734.
- [25] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [26] 毛蒋兴. 快速城市化过程中的深圳土地利用变化特征及影响因素研究[D]. 广州: 中山大学, 2006.

(上接第 270 页)

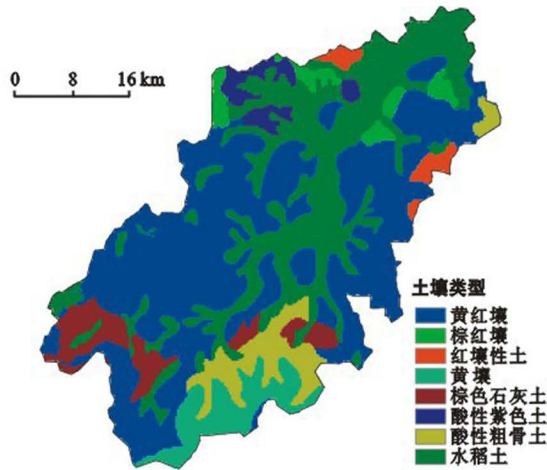
- [11] 刘绿柳. 水资源脆弱性及其定量评价[J]. 水土保持通报, 2002, 22(2): 41-44.
- [12] Luers A L. The surface of vulnerability: an analytical framework for examining environmental change [J]. Global Environmental Change Part A, 2005, 15(3): 214-223.
- [13] 陈亚宁, 杨青, 罗毅, 等. 西北干旱区水资源问题研究思考[J]. 干旱区地理, 2012, 35(1): 1-9.
- [14] 刘时银, 丁永建, 张勇, 等. 塔里木河流域冰川变化及其对水资源影响[J]. 地理学报, 2006, 61(5): 482-490.
- [15] 雷志栋, 胡和平, 杨诗秀, 等. 塔里木盆地绿洲耗水分析[J]. 水利学报, 2006, 37(12): 1470-1475.
- [16] 雷志栋, 甄宝龙, 尚松浩, 等. 塔里木河干流水资源的形成及其利用问题[J]. 中国科学: E 辑, 2003, 33(5): 473-480.
- [17] 王浩, 秦大庸, 王研, 等. 西北内陆干旱区生态环境及其演变趋势[J]. 水利学报, 2004(8): 8-14.
- [18] 张海涛, 周勇, 汪善勤, 等. 利用 GIS 和 RS 资料及层次分析法综合评价江汉平原后湖地区耕地自然力[J]. 农业工程学报, 2003(2): 219-223.
- [19] 李慧伶, 王修贵, 崔远来, 等. 灌区运行状况综合评价的方法研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(4): 543-548.
- [20] 陈攀, 李兰, 周文财. 水资源脆弱性及评价方法国内外研究进展[J]. 水资源保护, 2011, 27(5): 32-38.
- [21] 王为人, 屠梅曾. 基于层次分析法的流域水资源配置权重测算[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2005, 33(8): 1133-1136.
- [22] 肖艳秋, 杨德刚, 唐宏, 等. 塔里木河流域人口—经济分布不平衡特征分析[J]. 干旱区地理, 2012, 35(2): 309-317.



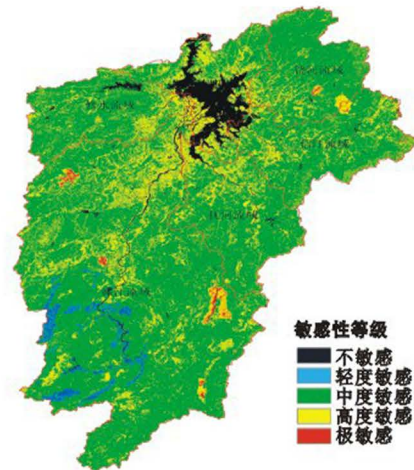
附图8 黑龙江省克山县古城小流域2010年土壤侵蚀强度



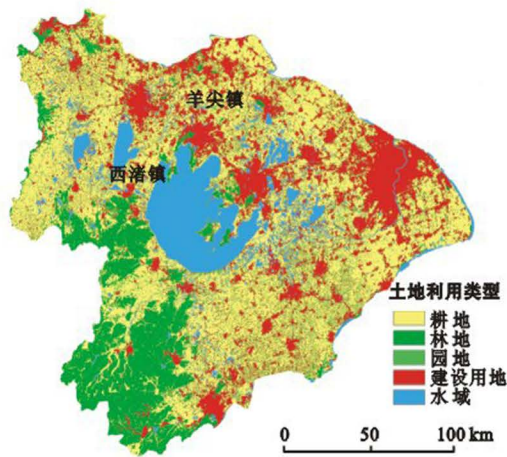
附图9 黑龙江省克山县古城小流域2010年土地利用状况



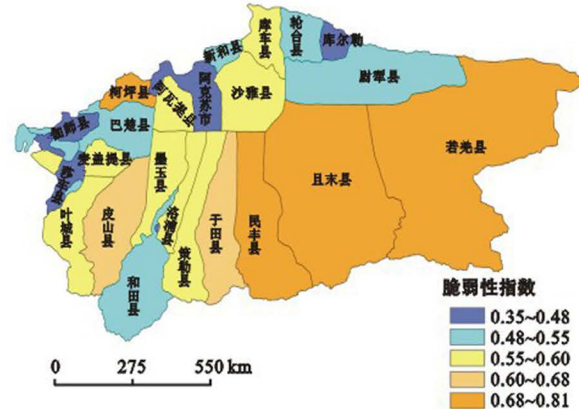
附图10 西苕河流域土壤类型分布



附图11 鄱阳湖流域土壤侵蚀敏感性综合评价



附图12 太湖流域土地利用类型



附图13 2010年塔里木河流域水资源脆弱性指数分布



附图14 1989,1999和2007年四川省甘孜州道孚县甲斯孔林场土壤侵蚀强度分布