

南水北调中线工程对汉江中下游流域 生态环境影响的综合评价

高永年,高俊峰

(中国科学院南京地理与湖泊研究所,南京 210008)

摘 要: 南水北调中线工程的实施,对汉江中下游流域的生态环境会造成一系列的影响,对其进行综合评价具有重要意义。在探讨评价指标体系建立原则的基础上,构建了南水北调中线工程对汉江中下游流域生态环境影响的综合评价指标体系;对各指标的影响分值进行了计算,并采用层次分析法计算各指标的权重,在此基础上采用指标加权求和法对生态环境影响进行综合评价。评价结果表明:南水北调中线工程的实施,对汉江中下游流域生态环境的综合影响程度为-37.91%~-64.46%,相比调水前,生态环境处于强烈或明显负影响状态;分变量的影响程度排序依次为水质变量、土壤地质变量、社会生产变量、水生生物变量、水资源变量和气候变量,其中对水质变量、土壤地质变量、社会生产变量和水生生物变量的影响幅度上限均超过了-40%,对水资源变量的影响幅度也超过了-20%,影响较大,而对气象变量的影响幅度几乎为零。

关 键 词: 南水北调;生态环境影响;综合评价;跨流域调水;汉江中下游流域

1 引言

受气候等因素的影响,我国北方地区水资源十分紧缺,严重制约了当地的社会经济发展,为缓解北方水资源供需矛盾,优化水资源配置,国家提出并实施了南水北调工程。其中,南水北调中线工程于2003年9月正式启动,它主要是为解决华北地区(主要是京、津、湖北和河南部分地区)缺水问题,南水北调中线工程的实施对促进我国华北地区经济社会和生态环境可持续发展具有重要的战略意义。

南水北调中线工程从丹江口水库陶岔闸引水,近期年调水量95亿 m^3 ,远期年调水量130亿 m^3 ,为此,丹江口大坝将在现有基础上加高14.6 m,坝顶高程由162 m提高至176.6 m,正常营水位由157 m提高至170 m,增加库容约116亿 m^3 ,总库容达到290.5亿 m^3 ,由年调节水库变为不完全多年调节水库^[1]。由此,丹江口水库的下泄水量将会大幅度减少,从而对汉江中下游流域的生态环境将会产生重大影响,截至目前为止,研究者分别从航运、河势、工业发展、水华、城镇生活、农业灌溉、水质、河

道水位、河道流量、流速、水文泥沙、河道演变、水环境容量、水生物、干流供水风险、气候(如温度、湿度、相对湿度)、防洪、城市发展、土地沙化、地下水位等^[1-10]不同角度对这一影响进行了分析,但尚缺乏生态环境影响的综合评价研究。为此,本文拟从这一方面展开研究,综合评价南水北调对汉江中下游流域的生态环境影响,以期为国家 and 各级政府战略管理和决策服务。

2 研究区概况

汉江是长江最大的支流,干流流经陕西、湖北两省,于武汉市注入长江,全长1577 km,河长居长江支流的首位。汉江干流丹江口以上为上游,河长约925 km;丹江口至钟祥河段为中游,长约270 km;钟祥至汉口龙王庙为下游,长约382 km;丹江口至汉口龙王庙之间的汉江干流控制流域为汉江中下游流域^[4](图1),控制面积6.4万 km^2 。汉江中下游流域属东亚副热带季风气候区,四季分明,气候温和,平均气温15~16.5℃,无霜期在230~260 d,多

收稿日期:2009-04;修订日期:2009-10.

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向项目(Kzcx2-yw-126-04)。

作者简介:高永年(1977-),男,安徽郎溪人,博士,助研,主要从事环境影响与生态风险评价、流域生态水文遥感与GIS区域建模等方面的研究。E-mail: yngao@niglas.ac.cn

通讯作者:高俊峰(1967-),男,博士,研究员,主要研究方向为流域过程模拟。E-mail: gaojunf@niglas.ac.cn

年平均降水量为 700~1300 mm,多年平均水面蒸发量在 900~1000 mm 之间^[1];流域地表高差较大,最高将近 3000 m,最低只有 10 m 多,除流域西部和北部边缘地区相对较高、起伏较大外,其他地区地表起伏相对较低,地面较为平缓(图 1);流域植被分布属于东部湿润亚热带常绿阔叶林亚区域,包括北亚热带常绿、落叶阔混交林地带和中亚热带常绿阔叶林北部亚热带,植被覆盖率为 25.9%^[1]。

汉江中下游流域开发历史悠久,交通发达,城镇、农业产业化走在湖北省前列,是湖北省经济发展的轴心地区;2007 年,该流域 GDP 总量达 4566.6 亿元,约占湖北全省的 50%;汉江干流中下游沿岸县市区,人均 GDP 达 18689 元,高于湖北省平均水平 15.32%,是湖北省经济发展的核心地区。

3 评价指标体系

3.1 指标体系构建原则

生态环境影响涉及自然、生态、环境、社会经济等多个方面,建立一个具有科学性、完备性及实用性的综合评价指标体系,是一件复杂而又困难的系统工程,为此,在建立评价指标体系时须遵循以下原则:

①科学性原则:即从生态环境影响的机理出发来设计指标体系,设立的指标必须概念清晰、物理意义明确、计算方法合理,具有一定的科学内涵和理论基础,指标的设置符合科学规律,能够客观反映生态环境影响的基本特征。

②综合性原则:即指标体系具有足够的涵盖面和尽可能大的集成度,应能够系统而全面的表征南水北调可能的生态环境影响,即能够从水量水质、土壤地质、气候、生物、社会生产等多个角度综合反映南水北调对各个子系统的影响,并组成一个完整的体系框架,综合的反映生态环境影响特征。

③代表性原则:即评价指标应紧紧围绕研究目标,针对南水北调生态环境影响的特殊性,从实际出发,突出重点,选择能突出反映研究对象的特性、符合客观实际水平的具有典型代表性的指标。因为生态环境影响涉及物理要素、生物要素和社会生产要素等多个子系统,涵盖的因素众多,选择指标时不能面面俱到,要在综合性原则指导下,重点选择具有典型代

表性的指标,使得指标体系能够用尽可能少的指标反映生态环境的现状特征和可能影响。

④层序性原则:即指标体系是一个复杂的系统,它由不同层次、不同要素组成,指标体系的建立应根据系统的结构分出不同的层次,在不同层次上进行指标分类,逐级划分,层次越高,指标越综合,层次越低,指标越具体,以此建立的指标才能结构清晰、逻辑关系明确,方便操作。

⑤可操作性原则:即指标体系不宜过于复杂,应简单明确,在选择指标时充分考虑资料数据的来源及获取的现实可能性,尽量选取数据可得、概念明确、可量化且计算方法简单的指标,从而保证指标体系的简易性和可操作性。

3.2 评价指标体系

根据上述指标体系构建的原则,在相关研究成果^[11-15]的基础上,构建了一套由目标层、系统层、状态层和指标层所组成的南水北调情景下汉江中下游流域生态环境影响综合评价 4 级指标体系框架,该指标体系框架包括 1 个目标因子、3 个系统因子、6 个状态因子和 24 个指标因子(表 1)。参考研究者对下泄水量^[16-17]、总水量^[10]、河道流量^[10]、流速^[9-10]、河道水位^[10]、冲淤^[18]、水环境容量^[19]、水华发生概率^[6]、河道内缺水量^[16]、水污染物允许排放量(污染负荷不变)^[20]、BOD₅、COD_{cr}、总磷^[2]、工业废水^[2]、地下水埋深^[21]、沙化土地^[10]、温度、湿度、相对湿度^[9]、生物数量(天然鱼产量)和生物种类数(鱼类品种)^[22]、人均水资源量^[23]、防洪标准^[24]、河道外用水缺水量^[16]、沿江涵闸和泵站取水保证率^[25]、航运能力^[25]等指标的相关研究成果并在相关计算的基础上,确定指标影响分

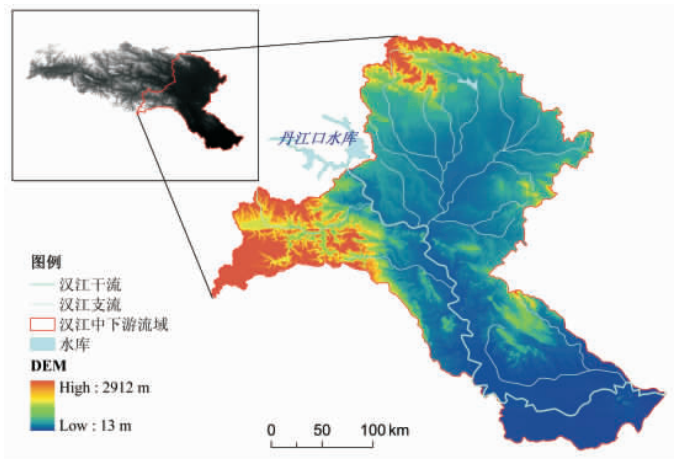


图 1 汉江中下游流域在汉江流域中的位置及其 DEM 与水系分布
Fig.1 The location of the middle-lower Hanjiang River Basin and its spatial distribution of DEM and river network

值,具体见表 1。由于环境影响评价是一种预测性的评价工作,本身带有一定的不确定性,而这在一定程度上也增加了评价结果的不确定性;同时,由于各研究者在计算模型方法等方面的差异,导致计算结果也出现一定差异性,因此本综合评价中指标影响分值以可能的影响范围来进行评价计算,以尽量减小计算结果的不确定性。

4 评价方法

4.1 评价模型及评价指标影响分值计算

南水北调对汉江中下游的生态环境影响综合评价采用综合加权求和法进行计算,其计算模型为:

$$G=\sum_{i=1}^n p_i w_i \tag{1}$$

式中: G 为生态环境综合影响程度指数, p_i 为第 i 指标的影响分值, w_i 为 i 指标的权重且 $\sum_{i=1}^n w_i=1$, n 为指标总数。指标影响分值 p_i 采用下式计算:

$$p_i=\frac{T_i-D_i}{D_i}\times 100\% \tag{2}$$

式中: T_i 为南水北调实施情景下第 i 指标的数值, D_i 为不实施南水北调情境下第 i 指标基准值。

如果分值 p_i 为负值,则表示为负面影响,即该指标在南水北调实施后趋于恶化状态;反之则为正面影响,有利于生态环境的优化。对于部分指标如水华发生概率、河道内缺水量、单位水均 BOD_5 、 COD_{cr} 、总磷量、单位水均工业废水量、土壤沙化、河道外用水缺水量,根据公式(2)计算的影响分值为正值,但实际上为负向作用,所以须在这类指标的影响分值计算结果前加注负号。评价指标体系中 3 个子系统 24 个指标的影响分值计算结果如表 1 所示,从表 1 可以看出,南水北调实施后,除防洪标准有所提高外,其他 23 个指标均向负方向变化,趋于恶化状态,影响较

为剧烈指标主要有河道流量、冲淤效果好天数、水环境容量、河道内缺水量、单位水均 BOD_5 、 COD_{cr} 、总磷量、单位水均工业废水量、地下水埋深、土壤沙化、生物数量(天然鱼产量)、河道外用水缺水量和航运能力(航运条件好月份数),影响幅度上限均超过了 40%。

4.2 评价指标权重确定与检验

(1)权重确定。在所建立的生态环境评价指标体系中,不同指标的相对重要程度即对生态环境影响的贡献率或影响程度并不相同;由于这种影响关系十分复杂,对其难以直接量化,因此采用层次分析法来计算不同指标的权重,以减少主观因素的影响。首先构造指标体系的判断矩阵,共 9 个即 A-B、B1-C、C1-D、C2-D、C3-D、C4-D、C5-D、C6-D 和 A-D,通过层次单排序和层次总排序计算得指标体系各级权重及 24 个指标综合权重值,如表 2 所示。

(2)权重的检验。为确保权重确定结果的合理性,需对权重计算的判断矩阵做一致性检验,层次单排序检验方程为^[26]: $CR=CI/RI$ (3)
式中: CR 为随机一致性比例, CI 为偏离一致性指标, RI 为随机一致性指标,其中 CI 计算方程为^[26]:

表 1 生态环境影响评价指标体系与指标分值

Tab.1 Index system and its score values of eco-environment impact assessment				
目标层	系统层	状态层	指标层	指标影响分值 /%
生态环境综合影响程度指数 A	水资源变量 C ₁		下泄水量 D ₁ / 亿 m ³	-28.5~-37.3
			总水量 D ₂ / 亿 m ³	-18.58~-23.17
			河道流量 D ₃ / (m ³ /s)	-21.25~-45.57
			流速 D ₄ / (m/s)	-11.24~-37.08
			河道水位 D ₅ /m	-2.71~-4.67
			冲淤效果好天数 D ₆ /d	-66.67
	水环境容量 D ₇		水环境容量 D ₇	-23~-42.6
			水华发生概率 D ₈ / %	-1~-4.40
			河道内缺水量 D ₉ / 亿 m ³	-61.66~-167.88
			水污染物允许排量 D ₁₀ / (t/a)	-32.37
			单位水均 BOD ₅ 、COD _{cr} 、总磷量 D ₁₁ / (t/亿 m ³)	-80.16~-90.95
			单位水均工业废水量 D ₁₂ / (万 t/亿 m ³)	-114.67~-127.52
	土壤地质变量 C ₃		地下水埋深 D ₁₃ / m	-11.75~-82.62
			土壤沙化 D ₁₄ / 万 hm ²	-92.31
	气候变量 C ₄		温度 D ₁₅ /℃	-0.0019~-0.0926
			湿度 D ₁₆ / /(g/m ³)	-0.0001~-0.0062
			相对湿度 D ₁₇ / %	-0.0095~-0.0947
	生物要素系统 B ₂	水生生物变量 C ₅	生物数量(天然鱼产量) D ₁₈ /t	-60.00
			生物种类数(鱼类品种) D ₁₉ /种	-33.33
	社会生产要素系统 B ₃	社会生产变量 C ₆	人均水资源量 D ₂₀ / 亿 m ³	-18.58~-29.96
			防洪标准 D ₂₁ (年一遇)/	400.00
			河道外用水缺水量 D ₂₂ / 亿 m ³	-100~-146.03
			沿江涵洞和泵站取水保证率 D ₂₃ /%	-20~-30
			航运能力(航运条件好月份数)D ₂₄ / 月	-62.50

表 2 判断矩阵计算结果及一致性检验指标
Tab.2 Maximum eigen value, weight values, consistency index and consistency ratio of the eight judge matrixes

判断矩阵	λ_{\max}	归一化权重向量 w	CI	CR
A-B	3.0183	(0.443429,0.1692,0.387371) ^T	0.0091	0.0158
B1-C	4.0788	(0.257622,0.563695,0.109471,0.0692124) ^T	0.0263	0.0292
C1-D	6.2804	(0.406535,0.283117,0.0926322,0.0506414,0.13805,0.0290251) ^T	0.0561	0.0452
C2-D	6.3993	(0.253638,0.0655959,0.468548,0.150054,0.0345875,0.0275759) ^T	0.0799	0.0644
C3-D	2	(0.666667,0.333333) ^T	0	0
C4-D	3	(0.333333,0.333333,0.333333) ^T	0	0
C5-D	2	(0.333333,0.666667) ^T	0	0
C6-D	5.2223	(0.0920163,0.0552394,0.444364,0.269212,0.139168) ^T	0.0556	0.0496
A-D	-	(0.047,0.032,0.011,0.006,0.016,0.003,0.063,0.016,0.117,0.038,0.009,0.007,0.032,0.017,0.01,0.01,0.01,0.056,0.113,0.036,0.021,0.172,0.104,0.054) ^T	0.0479	0.0531

$$CI=\frac{\lambda_{\max}-1}{m-1}$$
 (4)

式中: λ_{\max} 为判断矩阵的最大特征根, m 为判断矩阵的维数。一般认为,如果 CR 小于 0.10 则表示权重判断矩阵符合满意一致性要求,否则需要调整判断矩阵。根据层次单排序和层次总排序检验方程,计算得 λ_{\max} 、 CI 和 CR 的值(表 2),从表 2 可以看出所构造的 9 个判断矩阵包括层次总排序的随机一致性比例 CR 的值均小于 0.10,表示均具有满意的一致性,说明权重分配结果是合理的。

5 评价结果

根据生态环境影响评价模型(式 1),并依据指标影响分值和权重计算结果(表 1),计算得南水北调对汉江中下游流域的生态环境综合影响程度为-37.91%~-64.46%,总体影响程度高,说明南水北调实施后汉江中下游流域的生态环境将在现状条件下进一步恶化。通过对状态层各变量即水资源变量、水质变量、土壤地质变量、气候变量、水生生物变量和社会生产变量的影响程度的分析,结果表明南水北调对汉江中下游流域该 6 变量的影响程度分别为 -21.69%~-30.40%、-45.66%~-101.54%、-38.60%~-85.85%、-0.0031%~-0.08%、-42.22%和 -38.13%~-62.33%,可见南水北调的实施对各变量的影响程度差异较大,其中,对水质变量的影响最大,而对气候变量的影响程度最小,总的来看,各变量的影响程度排序为:水质变量>土壤地质变量>社会生产变量>水生生物变量>水资源变量>气候变量。

根据生态环境综合影响度及状态层变量影响度将生态环境影响划分为 5 个级别,各级别名称和分级标准如表 3 所示。南水北调对汉江中下游流域

表 3 生态环境影响级别划分与分级标准
Tab.3 Eco-environment impact ranks and grade standard

影响级别	级别名称	分级标准/ %
1	正影响	>0
2	轻微负影响	> -10 且 ≤0
3	明显负影响	> -40 且 ≤ -10
4	强烈负影响	> -70 且 ≤ -40
5	极端负影响	≤ -70

的生态环境影响高达-37.91%~-64.46%,影响级别属于 3-4 级,说明南水北调实施后,汉江中下游的综合生态环境处于强烈或明显负影响状态;其中,水质变量处于极端或强烈负影响状态,影响最大。土壤地质变量属于强烈或明显、极端负影响,社会生产变量属于强烈或明显负影响,水生生物变量属于强烈负影响,水资源变量属于明显负影响,气候变量处于轻微负影响,影响最小。

6 结论与讨论

综合评价结果表明,南水北调中线工程对汉江中下游流域的生态环境具有重要影响,相比调水前,调水的实施对汉江中下游流域生态环境的综合影响程度高达-37.91%~-64.46%,调水后汉江中下游流域生态环境处于强烈或明显负影响状态,说明南水北调实施后的汉江中下游流域的生态环境将会在现有基础上进一步恶化,将会直接影响和制约汉江中下游流域各县市区社会经济的发展和生态环境的改善。从分项评价结果来看,南水北调对汉江中下游流域水质变量、土壤地质变量、社会生产变量和水生生物变量的影响幅度上限均超过了 40%,同时,水资源变量的影响幅度也超过-20%,影响较大;因此今后应着重加强对汉江中下游流域水质变量、土壤地质变量、社会生产变量、水生生物变量

乃至水资源变量等方面的防灾减灾工作,针对这些重点变量的发展趋势,采取必要的补偿措施,最直接有效措施是进行调水补偿,以减小其影响程度。

论文从汉江中下游全流域的角度,对可能的生态环境影响进行了分析,由于区域范围大,指标体系复杂,计算过程中不可避免的存在一定的不确定性,在今后的研究中,应进一步定量评价汉江中下游流域涉及的各县市区特别是汉江中下游流经的县市区如老河口市、谷城县、襄樊市区、宜城市、荆门市区、潜江市区、天门市区、仙桃市区、汉川市和武汉市等和农业灌区涉及的县市区的生态环境影响,以期为各县市区进行调水补偿和采取对策措施提供必要的参考和依据;与此同时,应进一步定量核算汉江中下游全流域及其涉及县市区的缺水量,从而为调水补偿提供准确的数据支撑,为国家乃至涉及省特别是湖北省决策提供依据和参考。

参考文献

[1] 陈君. 南水北调中线工程对汉江中下游的水质影响. 武汉大学硕士学位论文, 2005.

[2] 张家玉, 罗莉, 李春生, 等. 南水北调中线工程对汉江中下游生态环境影响研究. 环境科学与技术, 2000 (增刊): 1-32.

[3] 范北林, 万建蓉, 黄悦. 南水北调中线工程调水后对汉江中下游河势的影响. 长江科学院院报, 2002, 19 (增刊): 21-24.

[4] 沈大军, 刘昌明. 南水北调中线工程不同调水规模对汉江中下游影响分析. 地理学报, 1998, 53(4): 341-348.

[5] 杜耘, 赵艳, 蔡述明, 等. 南水北调中线工程对汉江中下游工业发展的影响. 长江流域资源与环境, 1999, 8(2): 135-139.

[6] 谢平, 窦明, 夏军. 南水北调中线工程不同调水方案下的汉江水华发生概率计算模型. 水利学报, 2005, 36(6): 1-7.

[7] 曹正浩, 钱萍, 张菊红. 南水北调中线工程对汉江中下游城镇及农业灌溉用水的影响与对策. 南水北调与水利科技, 2003, 1(3): 8-10.

[8] 徐新伟, 吴中华, 于丹. 汉江中下游水生植物多样性及南水北调工程对其影响. 生态学报, 2002, 22 (11): 1933-1938.

[9] 王玉敏, 周孝德, 宁大同. 南水北调中线工程对汉江中下游气候的影响研究. 水土保持通报, 2001, 21(6): 40-42.

[10] 蔡述明, 殷鸿福, 杜耘, 等. 南水北调中线工程与汉江中下游地区可持续发展. 长江流域资源与环境, 2005, 14 (4): 409-412.

[11] 郭潇, 方国华, 章哲恺. 跨流域调水生态环境影响评价指标体系研究. 水利学报, 2008, 39(9): 1125-1130.

[12] 王西琴, 刘昌明, 杨志峰. 西线调水工程对水量调出区的环境影响分析. 地理科学进展, 2001, 20(2): 153-160.

[13] Feng S, Li L X, Duan Z G. Assessing the impacts of South-to-North Water Transfer Project with decision support systems. Decision Support Systems, 2007, 42 (4): 1989-2003.

[14] 鲍超, 方创琳. 干旱区水资源开发利用对生态环境影响的研究进展与展望. 地理科学进展, 2008, 27(3): 38-46.

[15] Mioklin P P. Environmental factors in soviet interbasin water transfer policy. Environmental Management, 2005, 2 (6): 567-580.

[16] 刘丙军, 邵东国, 许明祥, 等. 南水北调中线与汉江中下游地区的水资源利用关系研究. 南水北调与水利科技, 2003, 1(6): 6-9.

[17] 刘丙军, 邵东国, 许明祥, 等. 南水北调中线工程与汉江中下游地区相互影响分析. 长江流域资源与环境, 2005, 14(1): 66-70.

[18] 中国环境规划院. 南水北调工程生态环境保护规划简介. 中国水利, 2003, (2): 23-27.

[19] 方芳, 陈国湖. 调水对汉江中下游水质和水环境容量影响研究. 环境科学与技术, 2003, 26(1): 10-11.

[20] 曾群. 汉江中下游水环境变化及原因分析. 资源环境与发展, 2008(1): 9-13.

[21] 李智民, 赵德君, 贾淑霞. 汉江中下游地质环境综合整治区划与对策建议. 资源环境与工程, 2006, 20(5): 539-543.

[22] 曾群. 汉江中下游水环境与可持续发展研究. 华东师范大学, 2005.

[23] 湖北省环境保护局. 湖北省汉江中下游流域水污染防治规划, 2003.

[24] 韩亦方. 南水北调中线工程规划中的几个问题. 南水北调与水利科技, 2003, 1(3): 4-7.

[25] 湖北省环境科学研究院. 南水北调中线工程汉江中下游区环境影响评价报告, 1995.

[26] 李庆旭, 刘光琇, 邵麟惠. 层析分析法在高速公路生态环境影响评价中的应用. 冰川冻土, 2007, 29 (4): 653-658.

Comprehensive Assessment of Eco-environment Impact of the South-to-North Water Transfer Middle Route Project on the Middle-Lower Hanjiang River Basin

GAO Yongnian, GAO Junfeng

(Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

Abstract: The South to North Water Transfer Project, one of the four largest trans-century projects in China, may produce a series of influence on eco-environment in the middle and lower reaches of the Hanjiang River. So it will be of great significance to carry out an overall evaluation of this project. Based on the principle of building evaluation index system discussed in advance, an overall evaluation index system was built to assess the effects of the south to north water transfer project on eco-environment in the middle and lower reaches of the Hanjiang River Basin. After building an index core quantification model, the score of each index was calculated and the weight of each indicator was decided by the Analytic Hierarchy Process (AHP) method. Then weighted summation of each index was used to make the overall evaluation of the project on eco-environment. The result showed that the construction of the project would produce $-37.91\% \sim -64.46\%$ of effects on the change of eco-environment over the middle-lower Hanjiang River basin, which should have a strong or significant negative impact. And among the six eco-environment variables, the order from strong to weak in the extent was water equality, soil-geological variables, society production, aquicolous biology, water resource and climate respectively. In these variables, the upper effect magnitude of the project on water equality, social production, soil-geological and aquicolous biology variables exceed -40% and on water resource variable also exceed -20% . In terms of the five levels of eco-environmental impacts, including no, minor, significant, strong and extreme impacts, water equality was in the state of extreme or strong negative impact, soil-geological variable belonged to a strong, significant or extreme negative impact and social production belonged to a strong or significant negative impact state, aquicolous biology variables received a strong negative impact, water resource was in the state of significant negative impact, but climate in the minor negative impact state and the magnitude was close to zero.

Key words: the South-North Water Transfer Project; eco-environment impact; comprehensive assessment; inter-basin water transfer; middle-lower Hanjiang River Basin

本文引用格式:

高永年,高俊峰. 南水北调中线工程对汉江中下游流域生态环境影响的综合评价. 地理科学进展, 2010,29(1):59-64.