

秃尾河流域表生生态环境评价指标体系研究

杨泽元¹, 王文科¹, 王雁林^{1, 2}, 黄金廷¹

(1. 长安大学环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 陕西省国土资源厅, 陕西 西安 710054)

摘要 :以秃尾河流域为例,从地下水与表生生态环境关系的野外调查入手,以地下水为主线,在深入分析流域表生生态环境问题的驱动力的基础上,建立了流域表生生态环境递阶层次评价指标体系,并对流域表生生态环境现状进行了评价。评价结果表明,流域生态环境现状总体较好,其中盖沙丘陵区 and 沙漠区是流域水资源与生态环境保护的重点。

关键词 :评价指标体系;表生生态环境;秃尾河流域;陕北高原

中图分类号 :X820;G304 文献标识码 :A 文章编号 :1004-693X(2006)05-0022-06

Research on assessment index system of supergene eco-environment in Tuwei river watershed

YANG Ze-yuan¹, WANG Wen-ke¹, WANG Yan-lin^{1, 2}, HUANG Jin-ting¹

(1. School of Environment Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Shaanxi Bureau of Land and Resources, Xi'an 710054, China)

Abstract :According to the results of field investigation on the relationship between groundwater and supergene eco-environment in Tuwei river watershed, the influencing factors of supervene eco-environment problems were analyzed. An assessment index system of supervene eco-environment was established, and the present state of supergene eco-environment was assessed as well. The results show that the environment is good as a whole, but the hilly area covered with sand and the desert area are key areas in the protection of water resources and eco-environment in the watershed.

Key words :assessment index system; supergene eco-environment; Tuwei river watershed; North Shaanxi Plateau

秃尾河流域是陕北能源重化工基地的重要组成部分和供水水源之一,是我国正待开发的地区,位于毛乌素沙漠与黄土高原过渡地带,按照地貌类型从西北向东南依次分为湖群高原区、沙漠区、盖沙丘陵区和黄土梁峁丘陵区,其中沙漠和盖沙丘陵区占总面积的 2/3 以上^[1]。该地区干旱少雨,生态环境脆弱,生态环境对地下水依赖作用十分显著。鉴于目前国内外学者对表生生态环境的评价指标体系^[2-16]研究尚在探讨和发展中,为了促进流域水资源可持续开发利用和保护流域脆弱的生态环境,本

文以地下水为主线,在深入分析流域表生生态环境问题及其驱动力的基础上,建立流域表生生态环境评价指标体系并进行评价,可为评价生态环境脆弱区流域水资源开发利用对表生生态环境的影响以及保护流域水资源和生态环境提供科学依据。

1 概 况

秃尾河流域位于鄂尔多斯盆地东部,在东经 109°45' ~ 110°35' 和北纬 38°10' ~ 39°10' 之间,总面积 3 294 km²。总体地势西北高东南低。据神木气象站

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40472131);国家重点基础发展规划资助项目(G1999043606);陕西省自然科学基金资助项目(2002D13);长安大学基金资助项目(05Q14)

作者简介:杨泽元(1969—),男,重庆合川人,讲师,博士,从事水环境、生态环境及“3S”技术在水环境与生态环境领域的应用研究。E-mail: yang_zeyuan@126.com

1957~1990年观测资料,多年平均蒸发量1790.0mm,多年平均降雨量421.49mm,降水主要集中在7~9月,是区内主要的补给来源。秃尾河属黄河一级支流,发源于神木县瑶镇乡宫泊沟与圪丑沟,由西北流向东南,河道全长139.6km,是地下水的主要排泄场所。据高家川水文站资料,多年平均流量为13.8m³/s,年输沙量为337.4亿kg^[17]。主要的含水层为第四系萨拉乌苏组(Q_{3s})和烧变岩含水层(J_{1-2y})。水化学类型多为HCO₃-Ca型,矿化度小于1g/L。

2 地下水与表生生态环境的关系

流域地下水与表生生态环境关系十分密切,主要表现在地下水与盐渍化关系、地下水与植被演替的关系以及地下水与河流基流量的关系三个方面。

2.1 地下水与盐渍化的关系

流域内多年平均蒸发量是降水量的4~5倍,蒸发浓缩作用强烈。地下水位埋深越小,包气带岩性颗粒越细,地下水蒸发越强,土壤积盐效应越明显。根据野外调查,当地下水位埋深小于1.5m,地表岩性为粉砂时,其含盐量为8773μg/g,达到轻度盐渍化,地表出现白色盐壳,支持喜水耐盐的草本植物、沙柳灌丛以及碱草和马莲的生长。

2.2 地下水与植被演替的关系

对流域内典型植被沙柳灌丛、沙蒿灌丛、小叶杨和旱柳等的生长指标(灌木:冠幅、冠高、新枝长度、植被总盖度;乔木:树高、胸径、郁闭度等)与地下水位埋深之间关系的野外调查表明,随着地下水位埋深增加,流域植被从草本植物向沙柳灌丛向沙蒿灌丛演替;从小叶杨向旱柳演替,其演化结构如图1。

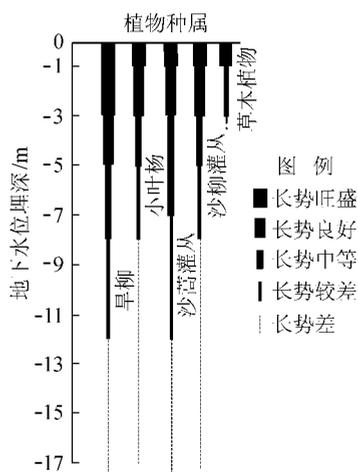


图1 流域植被演替规律

2.3 地下水与河流基流量的关系

流域内地下水的补给来源主要为大气降水。由于包气带岩性多为细砂和粉细砂,渗透能力强,即使在暴雨条件下一般地表产流也很少,降雨大部分直接渗入地下。地下水在获得大气降水补给后,基本上以基流形式补给河流,河流两侧地下水位愈高,基流量愈大。

根据流域高家川水文站多年径流量(1956~2000年)基流量和地下水位动态观测资料(1984~2000年)分析可知,河流基流量变化与地下水位埋深变化之间呈线性关系(图2)。

$$\Delta Q = 1.0464\Delta H + 0.2595 \quad (1)$$

$$r = 0.85 \geq r_{0.01}$$

式中: ΔQ 为河流基流量的变化量,m³/s; ΔH 为以1995年为参照年的地下水位埋深变化量,m; r 为相关系数。

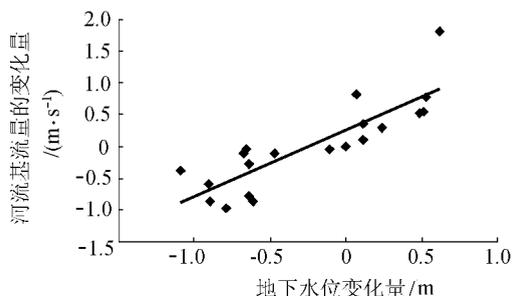


图2 河流基流量变化与地下水位变化关系(以1995年为参照年)

与1995年相比,若地下水位埋深减小,则河流基流量增加,反之,则河流基流量减少。

3 表生生态环境问题的驱动力分析

由上述可知,流域内主要的表生生态环境问题是荒漠化、植被演替与河流基流量的变化等,其驱动力是地质地貌、水文地质、气象水文、人类活动。

3.1 地质地貌因素

地质地貌是控制一个地区地下水量和水质宏观分布的基本因素和前提,包括地貌类型、包气带岩性和包气带结构三个方面。

3.1.1 地貌类型

秃尾河流经湖群高平原区、沙漠区、盖沙丘陵区 and 黄土梁峁丘陵区。湖群高平原区和沙漠区地势平缓稍有起伏,在侏罗系基底上沉积了从中更新统黄土—上更新统萨拉乌苏组冲湖积层—全新统风积沙的地层结构,这种地层结构极易接受大气降水的补给,含水层中等富水,地表以喜水的沙生植物沙柳灌丛为主,植被长势良好。

盖沙丘陵区地形起伏比沙漠区大,风积沙覆盖

在黄土梁上,在侏罗系基底上沉积了中更新统黄土—全新统风积沙的地层结构,这种结构相对来说不太利于大气降水的入渗,含水层富水性贫乏,地表从沙柳灌丛逐渐演变为沙生耐旱的沙蒿灌丛,植被长势较差。

黄土梁峁丘陵区地形切割严重,在侏罗系基底上沉积了从中更新统黄土—上更新统黄土的地层结构,这种地层结构和地貌类型不利于大气降水入渗补给,地下水贫乏且深埋,地表基本无风积沙,不适合沙生植被的生长,以丛生禾草为主,植被长势最差。

由此可见,地貌类型控制着区域表生生态环境的总体格局。

3.1.2 包气带岩性

一般而言,砂土和黏土不易返盐,而壤土则更易返盐,土壤中含盐量较高^[15]。随着岩性由细到粗变化,其含水量和含盐量是逐渐降低的。当地表岩性为粉砂(神木县尔林兔镇北剖面)时,其含盐量为 $8773 \mu\text{g/g}$;当地表岩性为细砂(神木县大保当乡小阿包村剖面,地下水位埋深为 1.8 m)时,含盐量下降为 $143.8 \mu\text{g/g}$ 。

3.1.3 包气带结构

包气带岩性变化、致密岩性层的存在对土壤水盐交替和植物生长有很大影响。当包气带岩性为单

一均质结构的松散沙层时,植物为了生存,根系会向地下水表面附近延伸以吸收水分,使植物的垂直根系比水平根系更为发育;当包气带剖面存在致密岩性层时,植物的水平根系更为发育,致密岩性层提供了植被生存所需的水分和矿物质,其含水量和含盐量明显比同种岩性的松散层高。如神木县大保当乡小阿包村包气带剖面(地下水位埋深为 3.63 m),致密细砂层中的含水量为 6.17% ,明显高于相邻松散细砂层中的含水量 $1.59\% \sim 2.4\%$;其含盐量为 $241.9 \mu\text{g/g}$,也明显高于相临松散细砂层中的含盐量 $125.9 \sim 176.15 \mu\text{g/g}$ 。

3.2 水文地质因素

水文地质因素主要包括地下水位埋深、地下水质、包气带含水量和包气带含盐量。

3.2.1 地下水位埋深

地下水位埋深是地表生态环境好坏的决定性因素,也是维系河流、湖泊、沼泽和湿地等水生生态系统存亡的主要因素。流域地下水位埋深与表生生态环境的关系见表1,与植物长势的关系见表2。

3.2.2 地下水水质

在地下水位埋深一定的情况下,地下水水质影响植被生长状况和地表荒漠化分布。

地下水矿化度与植被长势关系密切。不同类型植被、不同生长年龄的植被对矿化度的忍耐程度不

表1 流域生态地下水位埋深的主要特征

地下水位埋深/m	表生生态环境	主要特征
0~1.5	盐渍化	包气带含水量大,草本植物生物生产量大,乔灌木生长旺盛;包气带盐分积聚,土壤出现不同程度的盐渍化;潜水蒸发强烈,无效蒸发量大,河川基流量稳定,河道生态环境优良,湿地与湖淖发育。
1.5~3	最佳范围	包气带含水量适中,完全满足植物生理需水,乔灌木适宜生长,草本植物的生物生产量降低,但仍能生长;潜水无效蒸发量减小,河川基流量略有减少,但影响不大。
3~5	乔灌木承受范围	包气带含水量减少,但基本满足植物正常生长的生理需水,草本植物很少出现,乔木根系主根向下延伸吸收地下水,无枯梢或秃头现象,灌木主要吸收包气带浅部含水率相对较高的地段的水分;潜水的无效蒸发很小,几乎全部被植物吸收利用,河川基流减少,部分湿地干涸。
5~8	警戒范围	乔灌木虽可忍耐干旱,出现生理干旱,但长势不良。灌木主要吸收包气带剖面较深部含水率较高的地段的水分,乔木主要依靠吸收地下水,出现枯枝枯梢现象。潜水停止蒸发。河川基流急剧减少,部分支流河道出现断流。湿地大部分干涸。
8~15	乔木衰败	包气带含水量急剧降低,植物严重退化,土壤出现沙化现象。灌木吸收利用包气带深部的较低水分含量,生长较差,乔木等吸收地下水困难,出现衰败,树高变小或矮灌化,形成秃头或小老头树,大部分枯枝枯梢。河川基流大大减少,一些河道出现断流,河道生态环境恶化。
>15	乔木枯梢	包气带含水量进一步降低,植物退化死亡,土壤沙化严重。乔木主要依靠浅部水平根系吸收包气带水维持生存,生长显著退化,绝大部分枯梢死亡。潜水位以上的包气带大部份为薄膜水,难以被灌木所利用,灌木出现衰败,冠高、冠幅变小;主要河道断流,地表植被盖度随着地下水位埋深加大明显降低,促进风蚀沙化,导致固定、半固定沙丘活化。

表2 流域主要植物长势与地下水位埋深关系

植物种属	地下水位埋深与植被长势				
	<1.5 m, 生长旺盛	1.5~3 m, 生长良好	3~5 m, 生长正常, 无枯梢现象	5~8 m, 生长较差, 部分枯梢、秃头或形成小老头树	>8 m, 生长差, 易形成独树, 绝大部分枯死, 郁闭度低
沙柳			3~5 m, 生长良好	5~8 m, 生长较差	>8 m, 生长差
沙蒿			3~9 m, 生长良好	9~15 m, 生长较差	>15 m, 生长差
小叶杨			3~5 m, 生长正常, 无枯梢现象	5~8 m, 生长较差, 部分枯梢、秃头或形成小老头树	>8 m, 生长差, 易形成独树, 绝大部分枯死, 郁闭度低
旱柳	<3 m, 生长旺盛	3~7 m, 生长良好	7~12 m, 生长正常, 无枯梢现象	12~19 m, 生长较差, 部分枯梢、秃头或形成小老头树	>19 m, 生长差, 易形成独树, 绝大部分枯死, 郁闭度低

同。幼苗的忍耐性偏低,植株粗大的植被对矿化度的忍耐程度较强,因而在矿化度较高的环境中很难见到幼苗的生长。在地下水位埋深一定的情况下,随着矿化度的增加,植被可由水生系列向盐生系列演替。现状条件下流域地下水均为矿化度小于1g/L的淡水。

地下水化学类型影响荒漠化分布和植被的生长。如果地下水中氯化钠和硫酸钠含量太高,地表会形成盐土,使作物根、茎失水而枯萎死亡;如果地下水中碳酸钠和重碳酸钠含量太高,地表会形成碱土,造成作物烂根死亡;如果地下水中盐、碱含量都太高,则会使土壤迅速盐碱化,作物死亡^[16]。流域盐度和碱度图(图3)表明现状条件下地下水的盐度和碱度都很低,且地下水化学类型绝大多数为HCO₃-Ca型水,是优质的灌溉用水,不会对作物构成盐害和碱害。但在地下水开发、矿产开发以及强烈蒸发作用下地下水矿化度、盐度和碱度可能升高,超过灌溉用水水质评价标准,造成盐害和碱害。

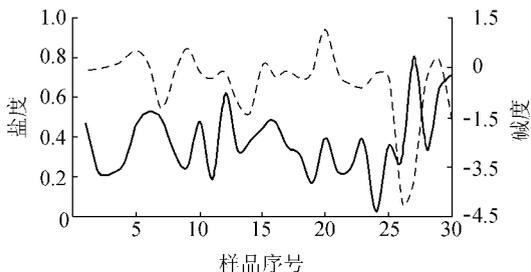


图3 流域地下水盐度和碱度曲线图

3.2.3 包气带含水量

包气带含水量影响植被盖度和长势。流域野外调查资料表明,植被群落盖度随包气带含水量的升高而增大,大体上呈对数关系(图4):

$$C = 33.531 \ln W + 46.195 \quad (2)$$

$$r = 0.996 \approx r_{0.05}$$

式中:C为植物群落盖度,%;W为地表包气带含水量,%;r为相关系数。

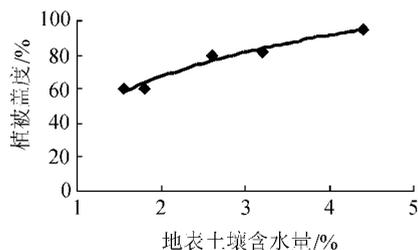


图4 植被盖度与地表土壤含水量关系

包气带含水量与植被生长关系密切。以沙柳灌丛为例,其冠幅与包气带含水量呈线性关系(图5):

$$L_f = 0.3225W + 1.0708 \quad (r = 1 \geq r_{0.01}) \quad (3)$$

式中:L_f为沙柳冠幅,m;W为包气带剖面0.20m深

度含水量,%;r为相关系数。

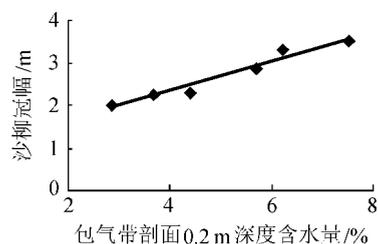


图5 沙柳冠幅与0.2m深度包气带含水量关系

流域植物长势与包气带含水量的关系表明,当包气带岩性为细砂时,2m以内包气带含水量在0.55%~15.66%之间,沙柳生长良好;当包气带岩性为粉砂时,2m以内含水量在1.41%~26.8%之间,旱柳生长良好。

3.2.4 包气带含盐量

包气带含盐量与表生生态环境和植被生长有关。根据野外调查资料,沙柳冠幅与0~0.3m深度包气带含盐量呈对数关系(图6):

$$L_f = 0.4456 \ln S - 0.2828 \quad (4)$$

$$r = 0.9973 \geq r_{0.05}$$

式中:L_f为沙柳冠幅,m;S为0~30cm深度包气带平均含盐量,μg/g;r为相关系数。

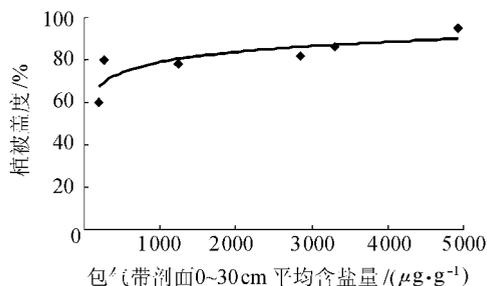


图6 沙柳冠幅与包气带剖面0~0.3m深度平均土壤含盐量关系

现状条件下流域不同地下水位埋深包气带剖面上含盐量大多较低,不会对植被的生长构成危害,仅在局部地段含盐量较高,达到轻度盐渍化,对植被生长有一定影响。

3.3 气象水文因素

3.3.1 气象因素

气象因素主要通过降雨和蒸发影响包气带和地下水,从而影响表生生态环境。

本区丰水期(7~9月)降雨量大,雨量集中,降水对地下水的补给作用十分显著,支持依赖地下水生存的天然植被;局部低洼地带,汇集成为海子或湿地,使海子或湿地周围喜水的草本植物或浅根性植被生长旺盛。

本区枯水期(除7~9月外)基本无降雨或降雨量小,蒸发作用强烈,多年平均蒸发量是降水量的4

~5倍。地下水位埋深越小,包气带岩性颗粒越细,地下水蒸发越强,土壤积盐效应越明显,使地下水浅埋区喜水耐盐植被发育。

3.3.2 水文因素

区内河流和地下水是同一来源的两种表现形式,河流基流量是由地下水排泄转化而来的,地下水的变化将引起河流基流量的变化。根据前述分析,流域地下水位上升,河流基流量增加,反之则减少。一旦流域开发引起地下水位持续下降,将导致河流基流量减少和河流生态功能退化。

3.4 人类活动因素

人类活动因素包括地下水资源开发和矿产资源开发等。人类活动对表生生态环境影响是在自然因素的基础上,改变水资源的状态,从而加速表生生态环境向好或差的方向转化的进程。

3.4.1 地下水资源开发

流域地下水允许开采资源总量是有限的。在保持开采量不变的情况下,不同的开采方式对流域表生生态环境的影响程度具有明显差异。一般来说,若采用引泉方式,将不会明显改变地下水流场的格局,只是对河流基流量产生一定影响,对表生生态环境的影响较小;若采用均匀布井分散开采方式,对地下水流场格局和河流基流量有较大影响,从而对地表生态环境产生明显影响;倘若采用集中供水水源地的开采方式,则会明显改变地下水流场的格局和河流基流量,并可能导致河流断流,河流生态功能退化,加剧荒漠化进程,使表生生态环境逐渐恶化。另外,地下水的开采程度也影响着表生生态环境,当地下水开采超过其承载限度,也会使流域的生态环境状况趋于恶化。

3.4.2 矿产资源开发

采矿活动通过破坏含水层结构改变地下水状态,从而影响表生生态环境。

流域是神府煤田的重要组成部分之一。由于含煤岩系延安组煤层直接上覆20~50m萨拉乌苏组或烧变岩含水层,而这两个含水层是维系流域表生生态环境和具有供水意义的主要地下水资源,大规模煤层开采必然疏干浅部含水层,导致地下水位大范围持续下降,发生地面塌陷、地面沉降和河流断流等,使植被退化死亡,土地荒漠化扩展。矿产开发程度越高,对地下水的破坏程度越大,从而对表生生态环境的影响就越大。

综上所述,地质地貌、水文地质和气象水文因素是一个地区的背景情况,决定了其生态环境的总体状况,对表生生态环境的影响具有区域性和缓慢性,因而现状的生态环境主要是由自然因素引起的,随

着陕北能源重化工基地的建设和投产,大规模人类开发活动与自然因素叠加,将剧烈地改变地下资源的状态,从而使脆弱的生态环境更趋脆弱。

4 表生生态环境评价指标体系

4.1 评价指标体系

参照国内外有关表生生态环境评价指标,根据野外调查资料,在分析流域表生生态环境影响因素的基础上,以地下水为主线,确定了流域表生生态环境评价指标。评价指标的选取遵循3个原则:①代表性;②指标之间不能有相关性和包容性;③所选用的指标要易于获取,具有科学性、系统性、层次性、完备性、可操作性、可靠性和动态性。以流域表生生态环境评价为目标层,以地质地貌因素、水文地质因素、气象水文因素为准则层,按各准则层隶属关系进一步细化成若干指标,建立了流域表生生态环境递阶层次评价指标体系(图7)。

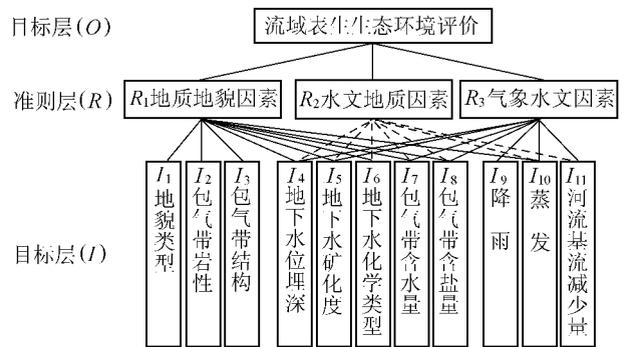


图7 流域表生生态环境递阶层次评价指标体系

4.2 评价

根据所建立的评价指标体系,利用层次分析法确定权重,采用自主开发的基于MAPGIS的生态环境评价信息系统对流域表生生态环境现状进行评价,得到了与实际相符的结果(图8)。评价结果表明,在现状条件下,除了盖沙丘陵区外,流域的生态环境状况较好,沙漠区的生态环境现状虽然较好,但一旦受到人类活动的干扰,其生态环境状况将迅速恶化,因而,盖沙丘陵区和沙漠区是流域开发时进行水资源与生态环境保护的重点。

5 结论

通过上述研究,得出以下结论:

a. 流域地下水与表生生态环境关系的野外调查表明,流域主要的生态环境问题为盐渍化、植被演替和河流基流量变化。

b. 在对流域表生生态环境问题的驱动力深入分析的基础上,以地下水为主线,建立了流域表生生态环境递阶层次评价指标体系,并对流域的表生生态

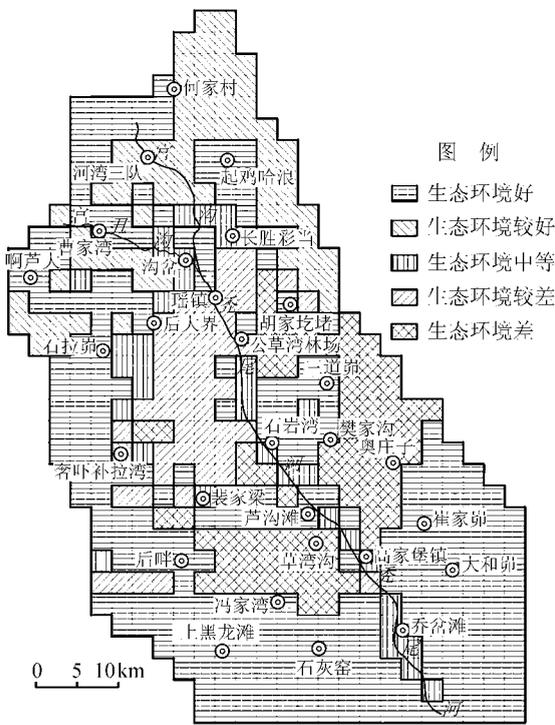


图 8 流域表生生态环境评价结果

态环境现状进行评价。评价结果表明,流域的表生生态环境现状总体较好。盖沙丘陵区 and 沙漠区是流域开发时进行水资源与生态环境保护的重点。

参考文献:

[1] 地质矿产部神府东胜环境地质综合组. 神府—东胜地区环境地质与水资源综合评价报告[R]. 1998.

[2] EMILIO C. Aquifer overexploitation :what does it mean ?[J]. Hydrogeology Journal 2002 ,10 :254-277.

[3] De VRIES J J. Prediction in hydrogeology :two case histories [J]. Geol Rundsch ,1997 ,86 :354-371.

[4] LIN Nianfeng ,TANG Jie ,HAN Fengxiang. Eco-environmental problems and effective utilization of water resources in the Kashi Plain ,western Terim Basin ,China[J]. Hydrogeology Journal , 2001(9) :202-207.

[5] WANG G ,QIAN J ,CHENG G ,et al. Eco-environmental degradation and causal analysis in the source region of the Yellow River[J]. Environmental Geology 2001 ,40 :884-890.

[6] BOUTALEB S ,BOUCHAOU L ,MUDRY J ,et al. Hydrogeologic effects on the quality of water in the Oued Issen watershed , western Upper Atlas Mountains ,Morocco[J]. Hydrogeology Journal 2000(8) :230-238.

[7] BABU R P ,SUBRAHMAN Y K ,DHAR R L. Geo-environmental effects of groundwater regime in Andhra Pradesh ,India[J]. Environmental Geology 2001 ,40(4-5) :632-642.

[8] MARIA V E ,CARLOS D D. Environmental effects of aquifer overexploitation :a case study in the Highlands of Mexico[J]. Environmental Management 2002 ,29(2) :266-278.

[9] SANDRA J Z ,RAY H F. Influence of groundwater depth on the

seasonal sources of water accessed by Banksia tree species on a shallow sandy coastal aquifer[J]. Oecologia 2002 ,131 :8-19.

[10] BELOUSOVA A P. A concept of forming a structure of ecological indicators and indexes for regional sustainable development[J]. Environmental geology 2000 ,39(11) :1227-1236.

[11] GAO Q ,MEI Y ,CHANPIN L ,et al. Effects of groundwater and harvest intensity on alkaline grassland ecosystem dynamics—A simulation study[J]. Plant Ecology ,1998 ,135 :165-176.

[12] WANG Wenke. Research on ecology-oriented groundwater in northwest of China[C]//李佩成,王文科,裴先治. 中国西部环境问题与可持续发展国际研讨会论文集. 北京: 中国环境科学出版社, 2004 :483-491.

[13] 张长春, 邵景力, 李慈君, 等. 地下水位生态环境效应及生态环境指标[J]. 水文地质工程地质, 2003(3) :6-10.

[14] 姜桂华, 王文科, 杨泽元. 关中盆地潜水含水层脆弱性评价[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2004 , 32(10) :111-115.

[15] 王文科, 栾约生, 杨泽元, 等. 人类重大工程对格尔木冲洪积扇水资源与生态环境系统的影响研究[J]. 西安工程学院学报, 2001 ,23(2) :6-11.

[16] 张玉, 崔旭. 疏勒河流域水文地质环境与盐渍土分布发育规律[J]. 甘肃农业, 2000(9) :15-17.

[17] 地质矿产部地质工程勘察院. 陕西神木县红碱淖—沟岔地区地下分水岭勘察研究报告[R]. 1992.

(收稿日期 2006-04-03 编辑: 高渭文)

(上接第 8 页)

[17] RAPPORT D J. Symptoms of pathology in the Gulf of Bothnia (Baltic Sea) ecosystem response to stress from human activity [J]. Biological Journal of the Linnean Society ,1989 ,37 :33-49.

[18] RAPPORT D J. Ecosystem services and management options as blanket indicators of ecosystem health[J]. Journal of Aquatic Ecosystem Health ,1995 ,4 :97-105.

[19] MORRICE J A ,VALETT H M ,DAHM C N ,et al. Alluvial characteristics , groundwater-surface water exchange , and hydrologic retention in headwater streams[J]. Hydrologic Process ,1997 ,11 :253-267.

[20] BOON P I. Bacterial biodiversity in wetlands[C]//In :Gopal B ,Junk W J ,eds. Biodiversity in Wetland :Assessment , Function and Conservation. Leiden : Backhuys Publishers , 2000 ,1 :1-30.

[21] CLARET C ,FONTVIELLE D. Characteristics of biofilm assemblages in two contrasted hydrodynamic and trophic contexts[J]. Microbial Ecology ,1997 ,34 :49-57.

(收稿日期 2005-04-26 编辑: 高渭文)