松花江流域湿地生态系统健康评价

罗遵兰[1,2], 赵志平[1], 孙 光[1], 吕凤春[1], 李俊生[1], 王 伟[1]

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 中国农业大学, 北京 100083)

摘 要:为了解松花江流域湿地生态系统健康状况,基于"压力—状态—响应"模型,选取流域 2008 年年降水量、湿润指数、人口密度、单位面积 GDP 值、距离道路远近、区域归一化植被指数(NDVImax)、区域净初级生产力(NPP)、土壤侵蚀强度、土地利用、国家级自然保护区分布 10 项指标构建流域湿地生态系统健康评价指标体系,采用加权求和法计算湿地生态系统健康指数,并分析其健康状况。结果表明,从面积大小讲,松花江流域 62.62%的湿地生态系统处于健康水平,37.38%的湿地生态系统处于疾病水平;从空间分布特征讲,健康湿地分布广泛,疾病湿地主要分布在工农业生产相对发达、人口较为集中、湿润水平较低、植被覆盖较差的平原区域;从行政区湿地平均健康水平方面讲,流域内 66.67%的行政区湿地平均健康程度为较健康,16.67%的行政区湿地平均健康水平分别为疾病及健康。建议针对湿地健康状况开展湿地生态保护与恢复措施。

关键词:湿地; 生态健康评价; 松花江流域; "压力—状态—响应"模型

中图分类号:X826 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-3409(2015)01-0105-05

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2015.01.021

Assessment of Wetland Ecosystem Health in Songhua River Basin

LUO Zunlan[1,2], ZHAO Zhiping[1], SUN Guang[1], LÜ Fengchun[1], LI Junsheng[1], WANG Wei[1]

(1. *Chinese Research Academy of Environmental Sciences*, *Beijing* 100012, *China*; 2. *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In order to master the wetland ecosystem health in Songhua River Basin, we built index system to assessment wetland ecosystem health based on the Pressure-State-Response (PSR) model. The index system includes ten indexes which were annual precipitation, moisture index, population density, GDP per area, land-road distance, the maximum of NDVI, NPP, soil erosion intensity, the land-use and area of national nature reserve. Then, we used the weighted sum method to evaluate the index of the ecosystem health in Songhua River basin, and analyzed its health condition. The results showed that 62.62% of the wetland area in Songhua River basin was at the healthy level and 37.38% of the area was at the morbid level. From the aspect of spatial distribution characteristics, the healthy level wetland distributed widely, the morbid level wetland distributed mostly in plain area where industrial and agricultural production were more developed, population WAS denser, wetness was higher and vegetation coverage was lower. From the aspect of administrative division, 66.67% of cities' wetland were at the less healthy level, 16.67% of cities' wetland were at the morbid level or health level. We advised to take some protection and restoration actions with respect to wetland health in this area.

Keywords: wetland; ecosystem health assessment; Songhua river basin; pressure-state-response model

湿地是陆地生态系统和水生生态系统相互作用形成的独特的生态系统,是人类最重要的生存环境和自然界最富生物多样性的生态景观之一,与森林、海洋一起并称为全球三大生态系统类型[1]。湿地生态系统健康是指湿地系统内的物质循环和能量流动未受到损害,关键生态组分和有机组织被完整保存,对长期或突发的自然或人为扰动能保持弹性和稳定性,整体功能表现出多样性、复杂性、活力[2]。目前湿地生态系统健康评价方法主要包括指示物种法和指标体系法,其中指示物种法在国外应用较多,国内的研究在多选用指标体系法[3]。指示物种法通过研究生态系统的关键种、特有种或濒危种的数量及分布对环境的改变具有的响应反映湿地生态系统的健康状况[4-5]。硅藻[6]、海草[7-8]、鸟类、小型哺乳动物、鱼

收稿日期:2014-03-10 **修回日期**:2014-04-30

资助项目:水专项子课题"松花江流域湿地生态系统保护及恢复技术方案研究"(2009ZX07207-001-04)

第一作者:罗遵兰(1979—),女,四川成都人,硕士,副研究员,主要从事生态环境保护相关研究。E-mail:luozunlan@163.com

通信作者:李俊生(1968—),男,安徽巢湖人,博士,研究员,主要从事生态保护及管理研究。E-mail:lijs@craes.org.cn

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

类[9]、爬行动物及大型无脊椎动物[10]等被广泛地作为指示物种来评价湿地生态系统的健康程度。生态系统健康评价指标体系法是采用层次分析法构建生态系统健康指标体系，Costanza 提出的生态系统健康指数被广泛认可[11]。美国环保署提出了用于不同级别及尺度的 3 层次的湿地健康评价指标及方法[12]。近几年我国针对河流、湖泊及滨海湿地等开展了生态系统健康评价指标体系研究，张祖陆[13]等根据湿地生态系统特征及功能构建了湿地生态系统健康评价指标。王一涵等[14]结合遥感和地理信息系统技术支持，建立水文地貌特征、景观特征和人类扰动等评价指标评价洪河国家级自然保护区湿地及其周边农场湿地的生态健康。湿地生态系统健康各指标分值一般通过专家打分法、模糊评价法[13,15]、综合指数法[14,16-17]获取，随着地理信息系统学科的发展，一些大尺度湿地健康评价逐渐利用遥感数据及 GIS 空间计算分析方法获取各指标值，这类研究多是基于“压力—状态—响应”(PSR)模型构建的评价指标体系[14,16,18]。

虽然目前已有大量关于湿地生态系统健康的研究，但较少从流域尺度评价区域湿地生态系健康的案例，因此，本文基于“压力—状态—响应”模型，采用指标体系法评价了松花江流域湿地生态系统健康水平，为流域湿地生态保护与恢复提供参考。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区域概况

本研究选定以松花江流域为主，包括黑龙江省、吉林省大部分地区和内蒙古自治区东部地区，总面积为 935 600 km²，地理坐标为：115°09′—136°00′E，40°82′—54°00′N。研究区地处北温带季风气候区，大陆性气候特点明显，冬季寒冷漫长，夏季炎热多雨，多年平均气温 5～3℃，多年平均降水量 500 mm 左右，流域三面环山，西部和北部为大兴安岭和小兴安岭。大兴安岭东坡较陡，西坡平缓，小兴安岭山地西侧平缓，东侧起伏较大，流域东部及南部为完达山脉、老爷岭、张广才岭和长白山脉。长白山主峰白云山海拔高程 2 691 m，是流域内最高点。东部山地的地形由东向西、由南向北逐渐变缓，流域西南部有一部分丘陵地带，整个地形向东北方向倾斜。流域人口约 8 900 万人。

根据实地踏勘及影像资料解译，2008 年松花江流域湿地面积为 98 358 km²，占流域总面积的 10.51%，其中水田湿地 37 406 km²，河渠湿地 4 638 km²，湖泊湿地 8 187 km²，水库坑塘湿地 2 010 km²，滩地湿地 2 721 km²，沼泽湿地 43 782 km²。流域内湿地分布广，全流域均有分布，湖泊湿地主要分布在流域中西部，水田湿地主要分布在流域东部，滩地沿流域水系分布较为明显。截至 2011 年，松花江流域共有内陆湿地自然保护区 76 个，总面积 33 389 km²，占湿地总面积的 33.95%。

1.2 数据来源

松花江流域土地利用及湿地空间分布矢量数据通过解译美国陆地卫星 Landsat5 提供的 2008 年 TM 遥感影像获取，TM 遥感影像时间为 2008 年夏季 7，8 月份，本研究利用该影像 4，3，2 波段合成假彩色图像，从图上可清晰的看到研究区植被呈鲜红色，水体呈深蓝色；降雨量空间分布数据采用松花江流域内部及周边气象站点 2008 年降水量数据利用 Anuspline 软件插值得到，分辨率为 1 km；国民生产总值(GDP)及常住人口 1 km 空间分布数据是根据地区统计资料，利用人口和 GDP 空间化方法计算获取[19-20]；归一化植被指数(NDVI)和净初级生产力(NPP)数据来自于美国 MODIS 产品；1∶100 000 土壤侵蚀强度数据由中国科学院资源环境科学数据中心提供；流域内国家级自然保护区矢量数据根据各自然保护区科考报告及规划报告，结合实地勘察获得。

2 湿地生态系统健康评价方法

2.1 湿地生态系统健康评价指标体系

本文基于“压力—状态—响应”模型，采用专家决策法，选取 2008 年松花江流域与湿地生态系统密切相关的年降水量、湿润指数、人口密度、单位面积 GDP、湿地距离道路远近 5 项指标作为压力指标，分别反映了对湿地健康影响的两个方面，即自然因素及人类活动影响因素。年降雨量及湿润指数，属于自然压力指标，该 2 项指标与湿地健康呈正相关，其值越高，对湿地健康越有利；而人口密度、单位面积 GDP、湿地距离道路远近 3 项指标为人类活动影响指标，与湿地健康呈负相关，其值越高，对湿地健康越不利。区域归一化植被指数(NDVImax)、区域净初级生产力(NPP)、区域土壤侵蚀强度等 3 项指标作为状态指标，前 2 者反映湿地植被在各因素影响下的生长状态，与湿地健康呈正相关，后者反映湿地的水土保持功能高低，与湿地健康呈负相关。区域土地利用类型现状、国家级自然保护区分布现状 2 个指标作为响应指标，前者是湿地生态系统对社会经济发展活动的响应，后者反映了湿地对人类保护措施的响应。采用归一化法对各指标空间计算值划分为 5 级，并分别赋分为 5 分、4 分、3 分、2 分、1 分，各指标权重值分别为 0.1，如表 1 所示。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　松花江流域湿地生态系统健康评价指标体系

系统	指标	很健康 5 分	健康 4 分	较健康 3 分	一般病态 2 分	疾病 1 分	权重
压力系统	年降水量/mm	>430	430～425	425～420	420～415	<415	0.1
	湿润指数	>－26	－26～28	－28～30	－30～32	<－32	0.1
	人口密度/(人·km^{-2})	<25	25～50	50～100	100～200	>200	0.1
	GDP/(万元·km^{-2})	<10	10～50	50～100	100～500	>500	0.1
	距离道路/km	5	4	3	2	1	0.1
状态系统	$NDVI_{max}$	>0.9000	0.9～0.85	0.85～0.8	0.8～0.75	<0.75	0.1
	NPP/(gc·m^{-2}·a^{-1})	>400	400～350	350～300	300～250	250	0.1
	土壤侵蚀强度	微度	轻度	中度	强度	极强度	0.1
响应系统	土地利用类型	水体、沼泽	水田、林地	草地	旱地	居民地与建设用地，沙地，盐碱地，裸地	0.1
	国家级自然保护区	是			不是		0.1

2.2　指标计算及表征

2.2.1　压力指标　本文压力指标包括年降水量、湿润指数、人口密度、单位面积上国内生产总值(GDP)以及湿地距离道路远近 5 项，均利用 ArcGIS 软件计算精度为 1 km 的空间分布数据，其中，湿地距离道路远近利用 ARCGIS 软件的空间计算功能按照距离道路 1 km，2 km，3 km，4 km 的缓冲距离，计算不同缓冲距离内土地面积，并绘制其空间分布图。湿润指数计算方法如式(1)所示。

$$I_m=(\frac{P}{ET_0}-1)\times 100\% \qquad (1)$$

式中：P——年降水量；ET_0——潜在蒸散量。潜在蒸散(ET_0)采用 1998 年联合国粮农组织修订后的 Penman-Monteith 公式计算。

2.2.2　状态指标　本文的状态指标为区域归一化植被指数(NDVImax)、区域净初级生产力(NPP)、区域土壤侵蚀强度等 3 项。区域归一化植被指数(NDVImax)是基于 2008 年美国 MODIS 1 km 栅格数据，采用每个栅格当年区域归一化植被指数(NDVI)最大值 $NDVI_{max}$ 表示流域湿地生态系统植被覆盖特征；区域净初级生产力(NPP)是采用 2008 年美国 MODIS1km 净初级生产力值(NPP)栅格数据表征湿地生态系统服务功能特征；区域土壤侵蚀强度采用 1∶100 000 土壤侵蚀强度空间分布数据表征流域土壤侵蚀强度空间分布状态。

2.2.3　响应指标　本文的响应指标为土地利用现状及国家级自然保护区分布 2 项，其中土地利用现状数据采用 2008 年松花江流域 Landsat5 TM 数据为遥感数据源，结合实地样点勘察及相关专家校正，解译获得，国家级自然保护区边界数据根据各国家级自然保护区统计资料及保护区规划报告，结合保护区管理相关专家意见绘制。

2.3　湿地生态系统健康评价方法

本研究采用湿地生态系统健康指数表示流域湿地生态系统健康水平，指数采用加权求和法计算，其计算方法如式(2) 所示，计算所得生态系统健康指数结果采用专家决策法划分为 5 级，每一级的指数范围及表征的湿地健康水平状态如表 2 所示。

$$H=\sum_{j=1}^{n} I_j \times W_j \qquad (2)$$

式中：H——湿地生态系统健康指数；n——评价指标的个数；I_j——第 j 种指标的分数；W_j—j 种指标的权重，根据专家决策，每项指标均赋分为 0.1，如表 1 所示。

表 2　湿地生态系统健康指数标准

湿地生态系统健康水平	疾病	一般病态	较健康	健康	很健康
湿地生态系统健康指数分值	1.7～2.5	2.5～3.0	3.0～3.5	3.5～4.0	4.0～4.6

3　湿地生态系统健康主要特征

3.1　各评价指标空间分布特征

3.1.1　压力指标　2008 年松花江流域年降水量、湿润指数、人口密度及单位面积国内生产总值(GDP)、距离道路远近空间分布格局如附图 2A，B，C，D，E 所示。流域东南部年降水量较高，达 700 mm 以上，中部和西部地区年降水量较低，深棕色区域所示，其值在 400 mm 以下，如附图 2A 所示。年降雨量越高，湿地健康程度越高。流域东南部及西北部湿润指数较高，如附图 2B 所示，湿润指数高达 20 以上，中部及西部湿润指数较低，部分地区在－40 以下，如附图 2B 所示，湿润指数越高，湿地健康状况越好。人口密度分布及单位面积 GDP 空间分布基本一致，即中部

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

高，东部较高，西部最低，如图附2C，D所示，人口密度分布越密集，单位面积GDP值越高，湿地健康程度越低。松花江流域道路修建十分密集，流域内46.73%的地区位于距离道路1 km距离的缓冲区内，24.81%的地区位于距离道路1～2 km缓冲区内，11.33%的地区位于距离道路2～3 km之间的缓冲区内，5.94%的地区位于距离道路3～4 km的缓冲区内，11.20%的地区位于距离道路4 km以外的缓冲区内，如附图2E所示，距离道路越近的湿地，其健康程度越低。

3.1.2 状态指标 2008年松花江流域区域归一化植被指数最大值($NDVI_{max}$)、净初级生产力(NPP)、土壤侵蚀强度等3项状态指标空间分布格局如附图2F，G，H所示。流域$NDVI_{max}$值大于0.9的区域面积极少，$NDVI_{max}$值大于0.85的地区分布广泛，$NDVI_{max}$值为0.7以下的区域主要分布在西部及中西部地区，如图2F所示，$NDVI_{max}$值越高，湿地健康程度越好。流域西南部地区净初级生产力(NPP)较高，主要大于400 g/(cm^2·a)，极少地区高于500 g/(cm^2·a)；中部和西部地区NPP较低，在200 g/(cm^2·a)以下，NPP值越高，湿地健康程度越高。流域土壤侵蚀有水力侵蚀、风力侵蚀及冻融侵蚀三类，其中，水力侵蚀分布广泛，以微度侵蚀为主，其次为轻度侵蚀；风力侵蚀主要分布在中部及西部，微度及轻度侵蚀为主；冻融侵蚀主要分布在东北部大兴安岭高纬度、高寒地区，微度和轻度侵蚀为主；土壤侵蚀强度越高，湿地健康程度越差。

3.1.3 响应指标 2008年松花江流域土地利用格局及国家级自然保护区分布格局如附I所示。从土地利用格局看，流域中部以旱地为主，西部以草地为主，东北部以水田湿地为主，其余地区主要分布林地，居民地及建设用地沿松花江及第二松花江分布较为密集，居民地及建设用地分布越密集的区域，湿地健康程度越低。流域内国家级自然保护区分散分布，面积约占总面积的6%，其中湿地自然保护区主要分布在流域西部及西南部，南部地区分布较少，自然保护区内部及周边湿地健康程度较高。

3.2 流域湿地生态系统健康特征

3.2.1 流域湿地生态系统健康现状 松花江流域湿地总面积为98 358 km^2，占流域总面积的10.55%，分布广泛。利用上述“压力—状态—响应”模型，计算得出基本单元为1 km的湿地生态系统健康评价栅格数据，如表3所示。结果表明，流域内较健康湿地分布最广，其次是一般病态湿地，第三是健康湿地，第四是疾病水平湿地，第五是很健康湿地。将疾病与一般病态湿地均划分为病态水平，较健康、健康及很健康水平湿地划分为健康水平，则松花江流域健康水平湿地有61 593 km^2，占湿地总面积的62.62%，病态水平湿地面积为36 765 km^2，占湿地总面积的37.38%，流域湿地整体较健康。

表3 湿地生态系系统健康水平评价结果

健康指数	健康水平	湿地面积/km^2	该类湿地占总湿地面积的百分比/%
1.7～2.5	疾病	4608	4.69
2.5～3	一般病态	32157	32.69
3～3.5	较健康	43435	44.16
3.5～4	健康	14896	15.14
4～4.6	很健康	3262	3.32

3.2.2 流域湿地生态系统健康水平空间分布特征 如图1所示，流域内很健康湿地主要分布在大兴安岭地区东南部南翁河自然保护区、绰那河自然保护区、多布库尔湿地自然保护区及鸡西市南部兴凯湖自然保护区及周边；健康水平湿地主要分布在东北部三江平原区，佳木斯市及鸡西市较为集中，呼伦贝尔盟西部有大面积分布；较健康水平湿地分布广泛而分散，每个斑块面积相对较小，但在呼伦贝尔盟东部、大兴安岭地区东部、佳木斯市、鸡西市分布较多，此外，齐齐哈尔市、松原市有零星分布；一般病态水平湿地主要分布在齐齐哈尔市、大庆市、哈尔滨市、绥化市及鹤岗市，该区域与湿润指数水平较低且植被覆盖水平也较低；疾病水平湿地主要分布在沿松花江干流及第二松花江干流地势相对平坦、工农业生产相对发达、人口较为集中、降水量较低的地区，如齐齐哈尔市中部、大庆市西部与齐齐哈尔市交界处、兴安盟东部、白城市中部、白城市西部与兴安盟交界处、绥化市中部、绥化市西南部与哈尔滨市交界区域。

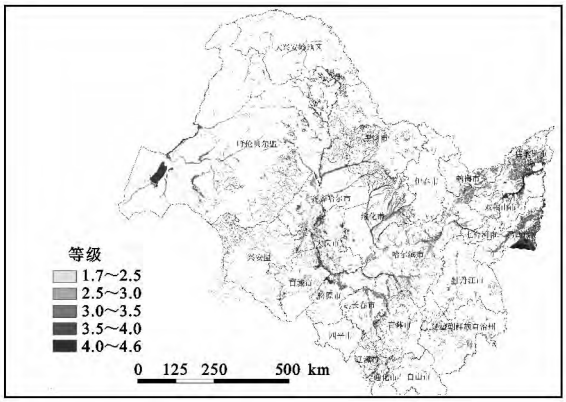


图1 2008年流域湿地生态系统健康评价空间格局

3.2.3 流域内各行政市(自治州、盟)湿地平均健康程度 如表4所示，流域内66.67%的行政区湿地平均健康程度为较健康，其湿地总面积为71 909 km^2，占总湿地面积的73.59%，流域内16.67%的行政区

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

湿地平均健康程度为一般病态，湿地总面积为 21 975 km^2，占总湿地面积的 22.49%，流域内 16.67%的行政区湿地平均健康程度为健康，湿地总面积为 3 829 km^2，占总湿地面积的 3.92%。

表 4　各行政市(自治州、盟)平均湿地生态系统健康水平

行政区名称	湿地面积/km^2	健康指数	健康水平	行政区名称	湿地面积/km^2	健康指数	健康水平
白城市	3486	2.88	一般病态	通化市	1222	3.5	健康水平
齐齐哈尔市	6484	2.92	一般病态	辽源市	600	3.57	健康水平
大庆市	4341	2.96	一般病态	大兴安岭地区	1856	3.58	健康水平
哈尔滨市	7809	2.98	一般病态	白山市	176	3.95	健康水平
兴安盟	3820	3.03	较健康	伊春市	1231	3.21	较健康
松原市	2725	3.05	较健康	延边朝鲜族自治州	2247	3.24	较健康
绥化市	6074	3.06	较健康	四平市	262	3.26	较健康
长春市	3188	3.07	较健康	呼伦贝尔盟	16914	3.31	较健康
七台河市	511	3.12	较健康	吉林市	3143	3.35	较健康
鹤岗市	2127	3.12	较健康	双鸭山市	3704	3.39	较健康
牡丹江市	1490	3.14	较健康	黑河市	7925	3.42	较健康
佳木斯市	9329	3.17	较健康	鸡西市	7694	3.42	较健康

4　结论与建议

4.1　主要结论

根据本文基于“压力—状态—响应”模型，以专家决策法构建湿地生态系统健康评价指标体系、确定各指标权重，并采用加权求和法计算流域湿地健康指数，绘制流域湿地健康状况空间格局图，得出以下结论：

(1) 从流域湿地健康程度面积方面看，松花江流域湿地生态系统整体较健康，其中 3.32%的湿地处于很健康水平，15.14%的湿地处于健康水平，44.16%的湿地处于较健康水平，32.69%的湿地处于一般病态水平，4.69%的湿地处于疾病水平。

(2) 从松花江流域湿地生态系统健康水平空间分布特征看：健康水平最好的地区分布在大兴安岭地区东南部及鸡西市南部小部分地区；健康水平最差的地区分布在齐齐哈尔市中部、大庆市西部与齐齐哈尔市交界处、兴安盟东部、白城市中部、白城市西部与兴安盟交界处、绥化市中部、绥化市西南部与哈尔滨市交界区域。

(3) 从松花江流域内各市(自治州、盟)湿地生态系统平均健康水平看，流域内各行政区湿地平均健康程度为较健康。其中，73.59%湿地为较健康水平，22.49%的湿地为一般病态水平，3.92%的湿地为健康水平。

4.2　建 议

本文基于“压力—状态—响应”模型，综合考虑影响湿地健康的自然因素及人为因素，选取降雨量、湿润指数作为自然压力指标，选取最能体现人类活动干扰的人口密度、单位面积上 GDP 及距离道路远近作为人类活动干扰压力指标。降雨量、湿润指数为压力指标中的正指标，即该两个指标值越高，越利于湿地生态系统健康，而其余三个指标为负指标，值越低越利于湿地生态系统健康。状态指标仅选取最能直接反映湿地生长发育状况及服务功能的三个评价指标，即反映湿地植被生长状况的 $NDVI_{max}$，反映湿地生产服务功能的初级净生产力，反映湿地水土保持功能的土壤侵蚀强度。响应指标分别选取国家级自然保护区分布反映人类活动保护管理湿地、促进湿地健康发展，选取土地利用现状反映人类活动干扰破坏湿地健康状况，两个指标在逻辑上与压力指标的正负指标相呼应。湿地生态系统健康评价指标体系系统、全面、简明、逻辑清晰，数据可获取性强，较前人研究有一定进步。此外，本文利用 GIS 的空间计算功能，绘制了松花江流域湿地健康水平分布格局图，从空间上直观的反映了松花江流域湿地健康状况，研究结果一目了然，为流域开展湿地生态保护与恢复提供了科学支撑。

松花江流域很健康及健康湿地多分布于自然保护区内及周边，通过空缺分析，发现尚有部分很健康湿地、健康湿地未分布在国家级自然保护区内，因此建议针对很健康及健康湿地开展提升自然保护区级别、扩大自然保护区范围、新建湿地自然保护区或湿地公园等技术措施保护湿地。一般病态湿地区域湿润指数及 $NDVI_{max}$ 值非常低，应采取增加重要湿地用水、植被恢复等措施恢复湿地生态。疾病水平湿地区域湿润指数较低、人口密度及单位面积 GDP 高、道路密集、土壤水力侵蚀较重，应通过增加湿地用水、合理规划人口及经济发展规模、适当减少人类活动干扰、开展水土保持等措施恢复湿地生态。

(下转第 114 页)

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

高，稳定性差，营造良好的小气候条件是实现生态系统稳定的基础。笔者对部分小气候因子日变化和季节变化进行具体阐述，但未结合乔木生长状况进行综合分析，以后需深入研究侧柏女贞混交林和侧柏纯林生长能力与小气候之间的关系，分析影响林木生长的主要小气候因子，使研究更加全面科学。

参考文献：

[1] 杨钙仁，苏晓琳，蔡德所，等. 针阔混交林转为桉树林对森林小气候的影响[J]. 水土保持研究，2013，20(5)：129-134.

[2] Bailey T G, Davidson N J, Close D C. Understanding the regeneration nicle: Microsite attributes and recruitment of eucalypts in dry forest[J]. Forest Ecology and Management，2012，269：229-238.

[3] Zhao J, Wan S, Li Z A, et al. Dicranopteris-dominated understory as major driver of intensive forest ecosystem in humid subtropical and tropical region[J]. Soil Biology & Biochemistry，2012，49：78-87.

[4] 马鸿儒，吉春容，李新建，等. 天山中部白杨沟天然林区森林小气候观测与分析[J]. 干旱区研究，2011，28(2)：251-254.

[5] 郑绍伟，黎燕琼，何飞，等. 卧龙森林生态站林内外主要气象因子对比分析研究[J]. 成都大学学报，2006，25(3)：210-213.

[6] 王岩魏，忠平，潘文利，等. 辽河三角洲泥质海岸防护林小气候效益研究[J]. 水土保持研究，2011，18(4)：65-68，73.

[7] 陈文年，卿东红，张轩波. 沱江流域马尾松、湿地松人工林小气候比较[J]. 福建林业科技，2011，38(1)：19-22.

[8] ZHU Jiao-jun, TAN Hui, LI Feng-qin, et al. Microclimate regimes following gap formation in a montane secondary forest of eastern Liaoning Province, China[J]. Journal of Forestry Research，2007，18(3)：167-173.

[9] 李保国，张雪梅，郭素萍，等. 生态经济型水土保持林对小气候的影响[J]. 林业科技开发，2013，27(3)：29-32.

[10] 宋西德，罗伟祥，侯琳. 沙棘、侧柏混交林效益的研究[J]. 水土保持学报，1995，9(4)：113-117.

[11] 王翠英. 农田防护林综合效益分析[J]. 安徽林业科技，2005(3)：54-55.

[12] 闫文德，田大伦. 樟树人工林小气候特征研究[J]. 西北林学院学报，2013，21(2)：30-34.

[13] 曾士余，朱劲伟，冯宗炜，等. 杉木人工林辐射状况的初步分析[J]. 生态学杂志，1985，4(5)：19-23.

[14] 朱凤荣，胡海波，杨文睿. 江苏丘陵区栎林土壤温度与水分特征[J]. 湖北农业科学，2013，52(1)：39-42.

（上接第109页）

参考文献：

[1] 吕宪国. 湿地生态系统保护与管理[M]. 北京：北京工业出版社，2004.

[2] 崔保山，杨志峰. 湿地生态系统健康评价指标体系：Ⅰ理论[J]. 生态学报，2002，22(7)：1006-1012.

[3] 林波. 湿地生态系统健康评价方法及其应用：以白洋淀湿地为例[D]. 北京：中国林业科学研究院，2010.

[4] 孔红梅，姬兰柱. 生态系统健康评价方法初探[J]. 应用生态学报，2002，13(4)：486-490.

[5] 罗跃初，周忠轩，孙轶，等. 流域生态系统健康评价方法[J]. 生态学报，2003，23(8)：1606-1614.

[6] Wang Y K, Stevenson R J, Sweets P R, et al. Developing and testing diatom indicators for wetlands in the Casco Bay watershed, Maine, USA[J]. Hydrobiologia, 2006，561(1)：191-206.

[7] Ferrat L, Pergent-Martini C, Roméo M. Assessment of the use of biomarkers in aquatic plants for the evaluation of environmental quality: application to seagrasses[J]. Aquatic Toxicology，2003，65(2)：187-204.

[8] Montefalcone M. Ecosystem health assessment using the Mediterranean *seagrass Posidonia oceanica*: A review[J]. Ecological Indicators，2009，9(4)：595-604.

[9] Bhattacharya B, Sarkar S K, Das R. Seasonal variations and inherent variability of selenium in marine biota of a tropical wetland ecosystem: implications for bioindicator species[J]. Ecological Indicators，2003，2(4)：367-375.

[10] Sharma R C, Rawat J S. Monitoring of aquatic macroinvertebrates as bioindicator for assessing the health of wetlands: A case study in the Central Himalayas, India[J]. Ecological Indicators，2009，9(1)：118-128.

[11] 马克明，孔红梅，关文彬，等. 生态系统健康评价：方法与方向[J]. 生态学报，2001，21(12)：2106-2116.

[12] 陈展，尚鹤，姚斌. 美国湿地健康评价方法[J]. 生态学报，2009，29(9)：5015-5022.

[13] 张祖陆，梁春玲，管延波. 南四湖湖泊湿地生态健康评价[J]. 中国人口·资源与环境，2008，18(1)：180-184.

[14] 王一涵，周德民，孙永华. RS和GIS支持的洪河地区湿地生态健康评价[J]. 生态学报，2011，31(13)：3590-3602.

[15] 周民，米文宝，杨清兵. 宝湖湿地生态系统健康评价研究[J]. 宁夏大学学报：自然科学版，2012，33(1)：106-111.

[16] 陈奕，许有鹏，宋松. 基于"压力：状态：响应"模型和分形理论的湿地生态健康评价[J]. 环境污染与防治，2010，32(6)：27-32.

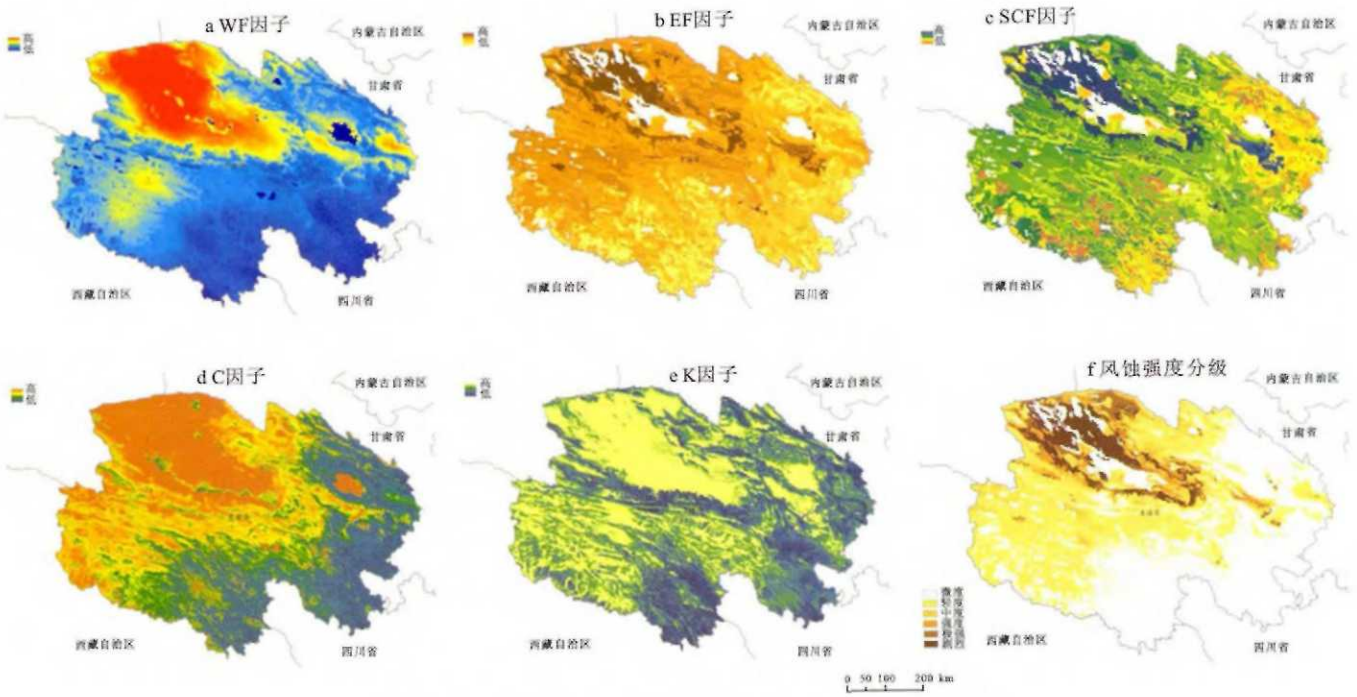
[17] 崔保山，杨志峰. 湿地生态系统健康评价指标体系. Ⅱ：方法与案例[J]. 生态学报，2002，22(8)：1231-1239.

[18] 蒋卫国，李京，李加洪，等. 辽河三角洲湿地生态系统健康评价[J]. 生态学报，2005，25(3)：408-414.

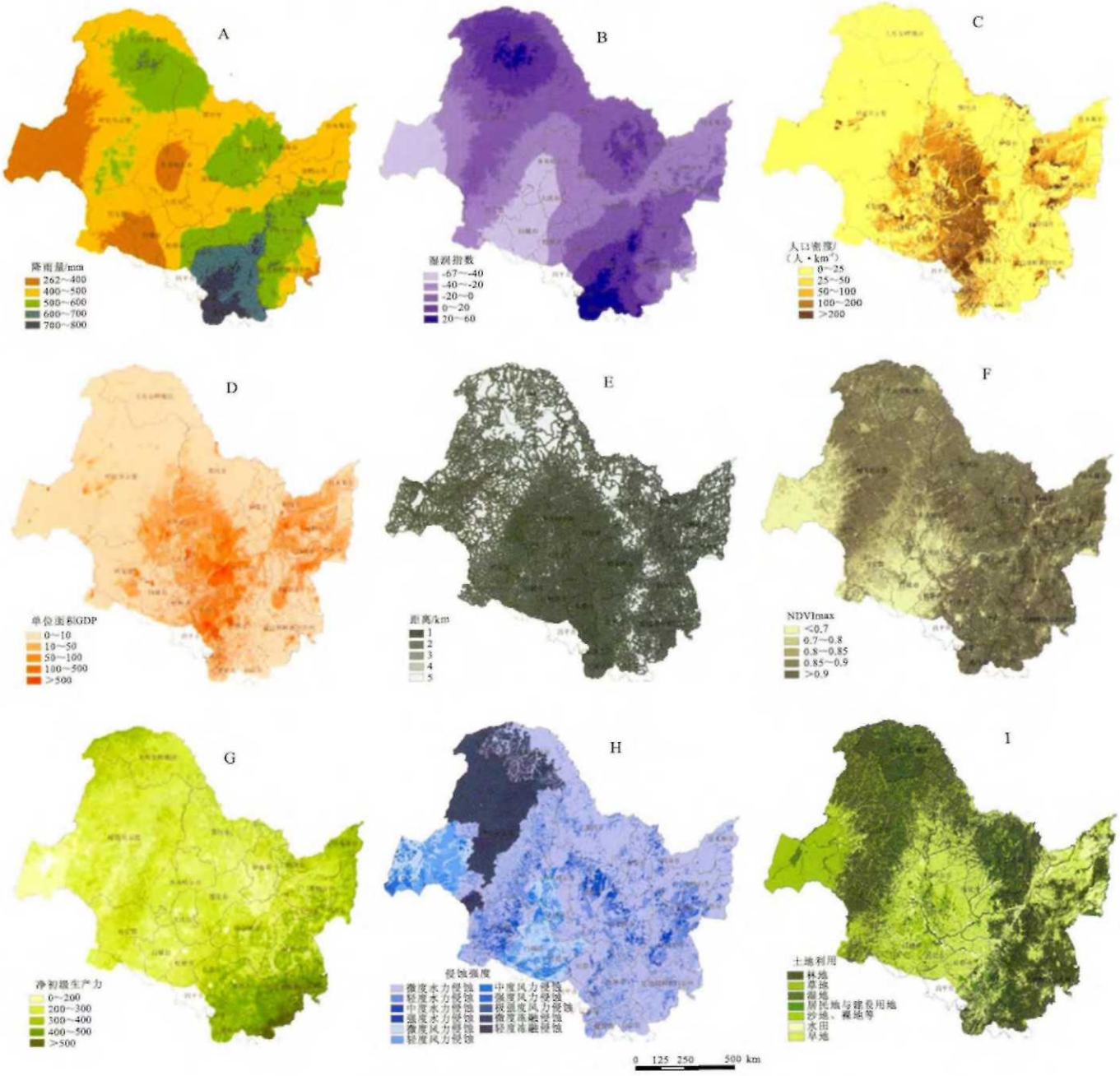
[19] 江东，杨小唤，王乃斌，等. 基于RS，GIS的人口空间分布研究[J]. 地球科学进展，2002，17(5)：734-738.

[20] 刘红辉，江东，杨小唤，等. 基于遥感的全国GDP1km格网的空间化表达[J]. 地球信息科学，2005，7(2)：120-123.

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



附图1 青海省RWEQ模型因子计算结果及土壤风蚀强度分布



附图2 2008年流域各评价指标空间分布格局

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net