

黄土高原典型区植被冗亏

索安宁^{1,2}, 熊 颖¹, 熊友才¹, 葛剑平^{1,*}

(1. 北京师范大学生物多样性与生态工程教育部重点实验室, 北京 100875 2. 国家海洋环境监测中心, 大连 116023)

摘要 选择了黄土高原中部典型区——泾河流域为研究区域。采用 Holdridge 潜在蒸发方法计算出了泾河流域的气候干燥指数, 构建了遥感植被指数与气候干燥指数之间的回归模型。通过该模型反衍出了泾河流域潜在植被指数, 提出以该指数为基础的植被冗亏格局的评价新方法。通过该评价方法发现, 在泾河流域西北部的大部分子流域的植被冗亏指数小于 -0.2 , 植被亏缺较为严重。在自然环境较差的流域北部, 植被冗亏指数介于 -0.20 到 -0.10 之间, 植被亏缺较轻。而流域东南部山区的大部分子流域的植被冗亏指数介于 -0.10 到 0.10 之间, 植被亏缺最轻。从植被冗亏的时间尺度上分析, 植被亏缺主要发生在植被生长旺盛的 6~9 月份, 其中农田植被亏缺最大, 冗亏指数在 7 月份可达到 -0.51 。稀疏草原植被亏缺较小, 其冗亏指数最小值在 -0.18 左右。森林植被的冗亏指数接近于 0。

关键词 黄土高原 潜在植被指数 植被冗亏指数 泾河流域

文章编号: 1000-0933 (2007)03-0989-08 中图分类号: Q948.1, Q948.4 文献标识码: A

Redundancy and deficiency of vegetation in a typical region of the Loess Plateau

SUO An-Ning^{1,2}, XIONG Ying¹, XIONG You-Cai¹, GE Jian-Ping^{1,*}

1 Ministry of Education Key Laboratory for Biodiversity and Ecological Engineering & Institute of Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 National Marine Environmental Monitor Center, Dalian 116023, China

Acta Ecologica Sinica, 2007, 27 (3): 989~996.

Abstract : Jinghe River Basin was chosen as a typical region of Loess Plateau. Potential evaporation equation of Holdridge was employed to calculate climatic aridity index (AI), and construct the regression model between Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and AI. Based on this model, we reversely deduced the potential vegetation index of Jinhe River Basin and proposed a novel assessment method to quantify vegetation redundancy and deficiency (VRD). By this method, we found that the VRD indices for most watersheds of the northwestern basin were less than -0.2 , displaying a severe vegetation deficiency. In the northern basin with atrocious natural conditions, the VRD indices ranged from -0.20 to -0.10 , a relatively slight deficiency. However, in southeastern hilly of the basin, the indices were only between -0.10 and 0.10 , the least deficiency. If analyzed in time series, vegetation deficiency generally occurred in high-vigor period from June to September. Farming vegetation had the largest deficiency, with the VRD index of -0.51 in July. Vegetation deficiency of sparse pasture was in the middle, with VRD index of -0.18 and that of forest vegetation was the least.

Key Words : the Loess Plateau ; potential vegetation index ; vegetation redundant-deficient index ; Jinghe River Basin

基金项目 国家基础研究发展规划资助项目 (2002CB111507) 国家科技攻关计划资助项目 (2004BA508B22)

收稿日期 2006-02-13 ; 修订日期 2006-07-20

作者简介 索安宁 (1977~), 男, 甘肃人, 博士, 主要从事景观生态与区域生态系统评价研究. E-mail : san720@sina.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail : gejp@bnu.edu.cn

Foundation item : This work was financially supported by Chinese National Key Project for Basic Scientific Research (No. 2002BC111507) ; The Key Technologies R & D Program of China (No. 2004BA508B22)

Received date 2006-02-13 ; **Accepted date** 2006-07-20

Biography SUO An-Ning, Ph. D., mainly engaged in landscape ecology and ecosystem assessment. E-mail : san720@sina.com

植被作为陆地生态系统的重要组成部分之一,长期以来一直是人们关注的焦点^[1~3]。黄土高原是中国陆地生态系统退化最为严重的自然地理单元之一,在退化生态系统的恢复工程中,存在着一个特别值得探讨的问题,即该区域现生植被与潜在植被差距究竟有多大,植被的亏缺究竟达到什么程度。对此问题不同的学者提出了不同的见解,地植物学和历史地理学界一般认为,人类活动的破坏导致了黄土高原原生植被的衰退,因此现生植被与潜在植被出现了显著偏差^[4~6]。自然地理学者和第四纪环境学者一般认为,黄土高原从气候和地质史的角度来看,可能本来就不是典型的森林分布范围,因此现生植被与潜在植被在分布上并不存在很大的差异^[7~9]。可以看出,构建基于当前气候条件的潜在植被是客观地评价黄土高原植被冗亏的重要依据,国内外学者对此展开了广泛的讨论,但目前还没有较为完善的潜在植被研究方法^[4~3, 10]。针对这个问题,本文选择了黄土高原的典型区域—泾河流域,试图根据植被-气候之间的密切关系,构建遥感植被指数与气候干燥度指数之间的回归模型,来推演该区域的潜在植被指数,并以此为依据对该区域现生植被的冗亏状况进行评价,为中大尺度植被冗亏评价寻求可行的方法。

为了分析方便,对有关名词做界定。

(1) 自然植被 指在没有人类干预条件下发育的植被。自然植被可能出现在现在,也可能出现在过去的任何时间;与当前气候条件处于平衡状态,也可能处于非平衡状态。

(2) 现生植被 目前所观察到的实际植被组成和分布状况。由于受人类干预的影响,目前许多地区的现生植被已经明显脱离了当前气候条件下的顶级状态,多以植被演替不同阶段的次生状态出现。在人类干预很微弱的地区,如果现生植被与当前气候条件处于平衡状态,则现生植被与潜在植被基本等同。

(3) 潜在植被 在当前气候条件下,当植被与气候条件完全达到平衡时所应发育的自然植被。由于人类活动等因素的干扰,目前地球上大部分地区的植被已经不代表潜在植被了。一些人工植被与现代气候条件也可能达到平衡,但是因为不是自然植被,所以也不能作为潜在植被看待。

(4) 原生植被 指人类显著干扰之前的自然植被。原生植被是自然植被的一个特例,它出现于没有人类干预的地区。原生植被与当时的气候条件可以处于平衡状态,也可以处于非平衡状态,由于不同地区人类活动显著干预植被的时间有早有晚,各地的原生植被可以出现在全新世的不同时刻。原生植被不同于潜在植被,后者要求植被与当时的气候条件必须达到平衡。

1 研究区概况

泾河流域位于黄土高原腹地,106°20′~108°48′E,34°24′~37°20′N,处于六盘山和子午岭之间,流域绝大部分属于陇东黄土高原,流域面积45421 km²。该区的东、西两侧为岛状山地,流域最南端为关中平原的一部分,流域中部为黄土残塬沟壑区、流域北部为黄土丘陵沟壑区。流域气候为典型的温带大陆性季风气候,处于温带半湿润向半干旱区的过渡地带。流域多年平均气温8℃,最冷月平均气温-8~-10℃,最热月平均温度22~24℃,年降水量在350~600 mm之间,夏季降水量一般占年降水总量的50%以上,且降水强度大。气候的地域分异导致了植被格局的递变,由黄土山地、黄土残塬沟壑到黄土丘陵沟壑依次出现了森林、灌丛和草地。

流域内农耕历史悠久,大部分黄土残塬、谷地、丘陵皆已开垦,天然植被保存较少,仅在沟底和梁、峁顶部有少量的次生植被。在水平地带,自南向北出现下列植被组合:榆树(*Ulmus pumila*)、槐树(*Sophora japonica*)、山丁子(*Malus baccata*)等疏林与旱生灌丛的组合;以酸枣(*Eziphyus jujuba* var. *spinosa*)、荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)、狼牙刺(*Sophora viciifolia*)为主的旱生灌丛与白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)草原的组合;以赖草(*Neurolepidium dasystachys*)、早熟禾(*Poa sphondylodes*)和鹅冠草(*Roegneria pendulina*)为主的草原;以长芒草(*Stipa bungeana*)为主的草原和以短花针茅(*Stipa breviflora*)为主的荒漠草原。在六盘山和子午岭,自下而上分布着旱生灌丛、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)和绣线菊(*Spiraea pubescens* S. *trilobata*)和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)为主的中生灌丛和山杨(*Populus davidiana*)、白桦(*Betula platyphylla*)、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)为主的落叶阔叶林与灌丛的组合。

2 数据与分析方法

2.1 数据来源

① MODIS 数据 全球土地利用数据库 (global land cover facility, GLCF) 提供的 2000 ~ 2003 年 MODIS 500M 32-day 合成产品。由于 MODIS 500M 32-day Composites 的计算日期采用的是儒略日 (Julian day), 需换算成公历日 (calendar day)。

② 气象数据 1970 ~ 2003 年泾河流域及其周边地区 30 个气象站的月平均温度、35 个雨量站的月平均降水资料。资料来源于中国气象局兰州干旱农业气象分局。

③ 地形数据 泾河流域 1:25 万数字地形数据, 用于生成泾河流域数字高程模型。资料来源于中国科学院地理与资源研究所。

2.2 干燥度指数的计算

许多研究表明植被与气候分布存在十分密切的联系 [1~14]。在黄土高原地区, 对植物生长起决定作用的是水分的可获得程度, 可以用干燥度指数来表征。干燥度指数 (ridity index, AI, 或其它缩写形式, 如 K 等), 在此特指气候干燥度, 是表征一个地区干湿程度的指标, 一般以某个地区水分收支与热量平衡的比值来表示 [5]。张新时利用 Holdrige 方法以中国 700 多个气象站点数据为基础绘制了中国蒸散率分布图, 他认为 Holdridge 方法为中国植被-气候分类提供了一个精度上基本令人满意且便于应用的定量分析方法 [6]。其他研究结果也认为 Holdridge 方法比较精细, 与植被的分布有明显的对应性 [6]。Holdridge 计算方法是一个通过温度来获得潜在蒸散量的经验公式 [7], 潜在蒸散量是温度的函数, 公式如下:

$$PET = 58.93 \times ABT \tag{1}$$

$$ABT = \sum_{i=1}^{12} T_i / 12 \tag{2}$$

式中, PET 为潜在蒸散量 (mm), ABT (annual biotemperature) 是年生物学温度 (℃)。生物学温度是植物可以进行营养生长的平均温度, 一般认为在 0 ~ 30℃ 之间, 日均温低于 0℃ 与高于 30℃ 者均排除在外, 超过 30℃ 的平均温度按 30℃ 计算, 低于 0℃ 的均按 0℃ 计算, T_i 是第 i 月份的平均温度。

潜在蒸散量 (PET) 与降水量 (P) 的比值即为干燥度指数, 计算公式如下:

$$K = \frac{PET}{P} \tag{3}$$

将 1970 年到 2003 年的逐月气象资料进行整理, 计算出每个站点多年月平均温度和年平均降水量。在 GIS 的支持下, 利用 1:25 万数字地形数据生成研究流域数字高程模型 (DEM), 将测站的多年月平均温度观测值根据其所在高程按垂直递减率, 校准到零海拔平面上, 然后进行空间插值, 生成 100m × 100m 的流域月平均温度栅格数据, 结合各单元网格的高程, 按温度垂直递减率对空间插值结果进行高程校正, 生成实际温度的空间分布栅格数据, 检验最高、最低温度之间的关系, 若模拟结果与常规不符, 则强制最高温度高于最低温度 0.05℃。

研究表明, 降水量与经度、纬度和海拔高度密切相关 [4]。本研究年降水数据依据研究流域 35 个雨量站点降水量、经纬度坐标和海拔高度数据, 采用多元逐步回归的方法, 得到多年平均年降水量与经度、纬度及海拔高度的回归模型。

$$P = 1297.634 - 165.413LAT + 46.822LONG + 0.0815ALT \quad R^2 = 0.769 \tag{4}$$

在 GIS 的支持下, 采用公式 (4), 得到 100m × 100m 年降水量的空间栅格数据。利用潜在蒸散量空间数据和降水空间数据, 叠加得到泾河流域年气候干燥度指数空间栅格数据 (图 1)。

2.3 植被指数的计算

归一化植被指数 (ormalized difference vegetation index, NDVI) 是监测地表植被特征的一个重要遥感植被指标。NDVI 与绿色叶片生物量、叶面积指数、植物光合能力、总的干物质积累以及年净初级生产力均有很好的相关性 [8]。因此, NDVI 常被用于大尺度植被覆盖及其动态变化监测、模拟各种植被及地表生物物理参数

与气候变化关系等方面的研究^[9]。归一化植被指数的计算公式为：

$$NDVI = \frac{p_{ch2} - p_{ch1}}{p_{ch2} + p_{ch1}} \quad NDVI \in (-1, 1) \tag{5}$$

式中, p_{ch1} 和 p_{ch2} 分别是第 1、2 波段的反射率。第 1 波段 Ch1 (0.58 ~ 0.68 μ m) 是红光波段, 处于叶绿素的吸收带。第 2 波段 Ch2 (0.75 ~ 1.10 μ m) 是近红外波段, 处于绿色植物的光谱反射区。

对 MODIS 数据进行预处理, 从每期数据中分割出研究区域, 根据 (5) 式计算出每期数据的 NDVI, 选取 2001 ~ 2003 年夏季 7 ~ 9 月份的 9 期数据取它们的平均值作为流域植被 NDVI 数据 (图 2 ~ 图 4)。

3 结果与分析

3.1 气候干燥度指数与遥感植被指数的关系

气候干燥度指数的空间分布反映了水热平衡的空间特征。分析泾河流域干燥度指数的空间特征 (图 1), 以流域东部的子午岭和西部的六盘山地最低 ($AI < 0.80$), 流域南部山地次之 (AI 在 0.80 ~ 0.90 之间)。这些山地因海拔高, 降水较大而温度偏低, 故水热平衡比较好。流域南部的低平原和河谷地带干燥度指数明显比相邻的黄土残塬沟壑区高, 显示出地形对干燥度指数空间格局的重要影响。由南向北, 随着降水量的逐渐减少, 水热平衡也逐渐被打破, 流域中部的董志塬地带干燥度指数增大到 1.0 左右, 到流域北部的环江流域达到 1.50 以上。

泾河流域是古代中国重要的农耕区之一, 几千年来受人类活动的干扰, 流域内大部分区域的原生植被已经消失, 但在人类干扰相对较小的局部山区地带, 基本上保持了植被-气候的地带性规律。为此, 本研究选取泾河流域内受人类活动干扰程度比较轻的自然植被点 50 个, 同时提取这些点的干燥度指数 AI 和植被指数 $NDVI$, 将 $NDVI$ 对 AI 作图, 从图 5 可以看出, $NDVI$ 与 AI 呈负相关, 利用 SAS 软件, 统计拟和得到如下回归模型：

$$NDVI = 1.647EXP (-1.039AI) \tag{6}$$
$$R^2 = 0.745$$

3.2 潜在植被指数空间特征

根据遥感植被指数与气候干燥度指数之间的回归模型 (6) 和泾河流域多年平均气候干燥度指数数据, 可以模拟出泾河流域潜在 $NDVI$ 的空间分布 (图 3)。可以看出, 泾河流域潜在 $NDVI$ 主要分布范围在 0.50 ~ 0.70 之间, 其占流域总面积的 56.15%。潜在 $NDVI$ 大于 0.70 的面积占到流域面积的 31.28%, 而潜在 $NDVI$ 小于 0.50 的面积仅占流域面积的 12.57%。

泾河流域潜在植被指数的分布规律具有明显的区域差异性, 流域南部高, 流域北部低, 由南向北逐渐递减。流域南部的达奚河子流域, 潜在 $NDVI$ 大于 0.80 的面积占子流域面积的 53.80%, 大于 0.70 的面积占子流域面积的 96.76%。流域中部的洪河子流域潜在 $NDVI$ 大于 0.7 的面积仅占该子流域面积的 13.74%, 而大于 0.60 的面积占到了 95.30%。到北部的环江子流域潜在 $NDVI$ 普遍比较小, $NDVI$ 小于 0.50 的面积占到该子流域面积的 52.47%, 小于 0.60 的面积占到该子流域面积的 95.67%。在东西方向上, 流域东边子午岭山区的三水河子流域, 潜在 $NDVI$ 大于 0.80 的面积占该子流域面积的 65.39%, 大于 0.70 的面积占到 97.59%；流域西边六盘山区的汭河子流域, 潜在 $NDVI$ 大于 0.80 的面积占该子流域总面积的 42.70%, 大于 0.70 的面积占到该子流域面积的 89.61%。而流域中部黄土残塬区的董志区, 潜在 $NDVI$ 相对较小, 大于 0.75 的面积仅占该区面积的 3.42%。

3.3 植被冗亏的空间格局

为了表征潜在植被指数与现生植被指数之间的差距, 定义植被冗亏指数如下：

$$VRD = NDVI_R - NDVI_P \tag{7}$$

式中, VRD 为植被冗亏指数, VRD 大于 0, 表示植被冗余； VRD 小于 0, 表示植被亏缺, $NDVI_P$ 为潜在 $NDVI$, $NDVI_R$ 为现实 $NDVI$ 。

接彩图 1,2,3,4

由模型 (f) 可以模拟出泾河流域植被冗亏的空间分布特征 (图 4)。可以看出,泾河流域植被冗亏较为严重,全流域有 96.30% 的面积存在不同程度的植被冗亏,其中占流域总面积的 2.05% 区域植被冗亏指数 < -0.40 ,植被冗亏极其严重;植被冗亏指数处于 $-0.40 \sim -0.30$ 之间的区域占流域总面积的 13.97%,植被冗亏较严重;植被冗亏指数在 $-0.30 \sim -0.20$ 之间的区域占流域面积的 35.70%,植被冗亏严重;植被冗亏指数在 $-0.20 \sim -0.10$ 之间的区域占流域面积的 34.15%,植被冗亏程度较轻;另外有 10.40% 的流域面积植被冗亏轻微 ($-0.10 < K < 0$)。

受地形、气候和人类活动等影响,泾河流域植被冗亏的区域差异比较大。流域西北部茹河和洪河子流域的植被冗亏最为严重,洪河子流域有 29.85% 面积植被冗亏指数小于 -0.30 ,有 87.64% 的流域面积植被冗亏指数小于 -0.20 。茹河子流域有 61.20% 的面积植被冗亏指数小于 -0.30 ,91.33% 的流域面积植被冗亏指数小于 -0.20 。处于流域东部子午岭山区的合水川和三水河子流域植被冗亏程度比较轻,合水川有 29.24% 的流域面积植被保存比较好,没有出现冗亏问题,有 37.35% 的面积植被冗亏较轻 ($-0.20 < K < -0.10$) ;三水河子流域有 56.40% 的面积植被冗亏指数大于 -0.10 ,有 30.11% 的流域面积植被冗亏指数在 $-0.20 \sim -0.10$ 之间。流域北部的环江子流域由于相对干旱,潜在植被指数也较小,整个子流域的植被冗亏不是很严重,59.72% 的流域面积植被冗亏指数在 $-0.20 \sim -0.10$ 之间。流域下游的泾河干流区是整个流域地势最为低平、人口最为密集的一个区域,区域大部分面积被开垦为耕地和其他非农业用地,所以该区域植被冗亏也很严重,有 19.33% 的面积植被冗亏较严重,有 24.14% 的流域面积植被冗亏严重。

3.4 植被冗亏的时间格局

选取泾河流域主要植被类型代表点,用 GPS 定位。提取其现生植被 NDVI 和潜在植被 NDVI,在现生植被 NDVI 数据中选择与各主要植被类型的潜在 NDVI 值相等的点,提取与潜在 NDVI 值相等点的现生植被 NDVI 年内序列作为该类型潜在植被的 NDVI 年内动态,同时提取出每一种植被类型的现生植被指数 NDVI 序列,通过模型 (f) 可得到泾河流域主要植被类型年内植被冗亏动态 (图 6)。可以看出森林植被的动态冗亏指数比较大,植被冗亏系数在 0 左右。灌丛植被 NDVI 序列与其潜在 NDVI 序列在 1~4 月份差距比较小,5 月份开始现生 NDVI 与其潜在 NDVI 之间的冗亏开始加大,6 月份植被冗亏系数达到 -0.20 ,此后一直保持在 $-0.2 \sim -0.15$ 之间。草丛和典型草原的 NDVI 与其潜在 NDVI 相比全年都存在较大的冗亏,尤其是 6~9 月份冗亏比较大,9 月份可达到 -0.28 ;典型草原植被冗亏系数 7~9 月份分别为 -0.17 、 -0.21 、 -0.25 。农田是人类改变自然植被产生的一种人工植被,其植被冗亏动态明显带有人类干预的痕迹,从 6 月份开始随着农田冬小麦的成熟、收割,植被冗亏指数逐渐减少,6 月份为 -0.43 ,7 月份为 -0.51 ,8 月份为 -0.419 ,9 月份第 2 年冬小麦播种出苗,植被冗亏系数增大到 -0.39 。稀疏草地是流域北部最主要的植被类型之一,其发育最好的 7 月份,植被冗亏系数为 -0.18 ,与其他植被类型相比较,冗亏程度相对较小。

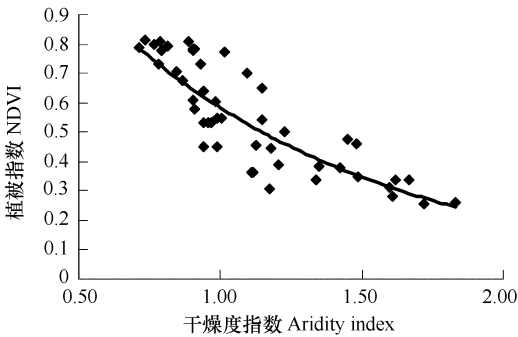


图5 植被指数 NDVI 与干燥度指数的关系
Fig. 5 Relation between NDVI and aridity index

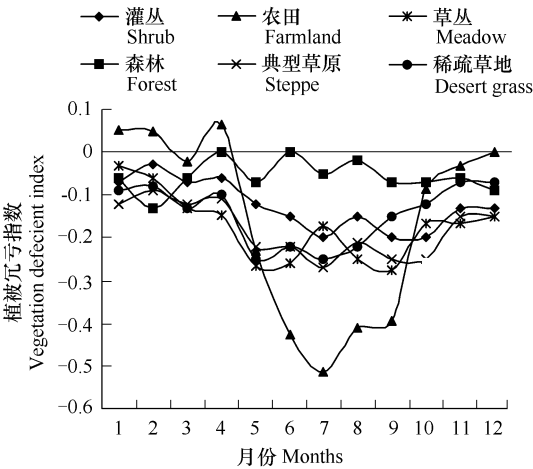


图6 植被冗亏指数的年内动态
Fig. 6 Chang in vegetation deficient index during the seanal course

4 结论

客观的评价一个地区的植被冗亏状况一直是地植物学家面临的一个难题,其难点在于很难找到一种十分恰当的评价标准。不同学者分别提出以自然植被、原生植被和潜在植被等作为参照标准来评价现生植被的冗亏状况^[10~24],但目前在人类活动强烈干预的黄土高原地区中,自然植被仅残存于局部山地、沟谷之中,原生植被也只能通过古生物遗迹来推断,依据这些局部点的植被情况很难建立比较细致的植被评价参照标准。潜在植被被认为是现生植被进行评价和生态恢复比较可靠的依据,但迄今为止,还没有人对潜在植被分布进行过系统的研究,也没有获得公认的潜在植被分布图可资借鉴^[10, 25, 26]。

本文通过建立遥感植被指数与气候干燥度指数之间的回归模型,来模拟黄土高原典型区域的潜在植被指数,并以此为基础对该区域植被冗亏的时空格局进行了分析。本研究结果表明:泾河流域植被欠缺在空间上存在明显的区域差异,其中蒲河、茹河和洪河子流域及泾河、汭河、黑河子流域的中下游最为严重,植被冗亏指数一般在-0.30以下,流域东部的子午岭山区各子流域和达奚河及泾河、汭河、黑河等子流域的上游植被欠缺较小,流域北部的黄土丘陵区植被冗亏指数主要在-0.20~-0.10之间,植被欠缺不是很严重。在时间格局上,森林植被年内各月份基本不存在欠缺,冗亏指数在0.1~-0.1之间,稀疏草地的欠缺相对也比较小,其他各主要植被类型的欠缺主要发生在植被发育茂盛的6~9月份,人类活动改造成农田的植被欠缺最大,冗亏指数在7月份可达到-0.51。以上结果相对客观的反映了泾河流域的植被欠缺状况,但这种评价方法还只是一种新的尝试,在方法上还有待完善,尤其是建立客观的潜在植被指数方面还有待进一步探索。

References :

[1] Jose M R. Modelling potential evapotranspiration of potential vegetation. *Ecological Modelling*, 1999, 123 :141—159.

[2] Kimura R, Liu Y, Takayama N, *et al.* Heat and water balances of the bare soil surface and the potential distribution of vegetation in the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Environment*, 2005, 63 :439—457.

[3] Martin S, Prentice L, Laarif F. Quantifying the impact of global climate change on potential natural vegetation. *Climate Change*, 1999, 41 :37—52.

[4] Wu Z Y. China vegetation. Beijing :Chinese Science Press, 1980. 749—1037.

[5] Zhu Z C. Distribution of forest and steppe on the Loess Plateau. *Acta Phytocologica et Geographica Sinica*, 1983, 8 :122—131.

[6] Shi N. On distribution and change of historical forest of China. *Chinese Historical Geography*, 1991, 3 :43—73.

[7] Liu T S, Guo Z T, Wu N Q, *et al.* Prehistoric vegetation on the Loess Plateau :steppe or forest ?*Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 1996, 13 (5) :341—346.

[8] Lv H Y, Liu D S, Guo Z T. Situation of epibiotic vegetation study in geological period and historical period on the Loess Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48 (1) :2—7.

[9] Zhang X S. A classification system of vegetation-climate for global change research. *Quaternary Science*, 1993, 13 :157—167.

[10] Ren G Y. On baseline vegetation in northern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (6) :1287—1293.

[11] Fang J Y, Yoda K. Climate and vegetation in China III. Water balance and distribution of vegetation. *Ecological Research*, 1990, 5 :9—23.

[12] Zhang J T. A study on relations of vegetation, climate and soils in Shanxi Province, China. *Plant Ecology*, 2002, 162 :23—31.

[13] Richard Y, Pocard I. A statistical study of NDVI sensitivity to seasonal and interannual rainfall variations in southern Africa. *Int Journal of Remote Sensing*, 1998, 19 (1) :2907—2920.

[14] Fu C B, Wen G. Variation of ecosystems over East Asia in association with seasonal interannual and decadal monsoon climate variability. *Climate Change*, 1999, 43 :477—494.

[15] Wang Y F, Xiao X M. Climatic gradient of main vegetation types in the Loess Plateau region. *Acta Botanica Sinica*, 1993, 35 (4) :291—299.

[16] Zhou J J, Zhou L H. Analysis of vegetaion-climate relations in Chaidamu region by Thornthwaite and Holdrige potential evaporation index. *Arid Region Research*, 1996, 13 :46—51.

[17] Holdrige L R. Determination of world plant formation from simple climate data. *Science*, 1947, 105 :367—368.

[18] Birky A K. NDVI and a simply model of deciduous forest seasonal dynamics. *Ecological Modelling*, 2001, 143 :43—58.

[9] Richard Y, Pocard I. A statistical study of NDVI sensitivity to seasonal and interannual rainfall variations in southern Africa. *Int J Remote Sensing*, 1998, 19 (1) :2907—2920.

[20] Hou X Y. Vegetation of China with reference to its geographical distribution. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 1983, 70 (4) :509—549.

[21] Zhao C Y, Nan Z R, Feng Z D. GIS-assisted spatially distributed modeling of the potential evapotranspiration in semi-arid climate of the Chinese Loess Plateau. *Journal of Arid Environment*, 2004, 58 387—403.

[22] Prentice I C, Guiot J, Huntley B, *et al.* Reconstructing biomes from palaeoecological data :A general method and its application to European pollen data at 0 and 6000 ka. *Climate Dynamics*, 1996, 12 :185—194.

[23] Yu G, Chen X, Ni J, *et al.* Palaeovegetation of China :Apollen data based synthesis for the mid-Holocene and last glacial maximum. *Journal of Biogeography*, 2000, 27 :635—664.

[24] Sun X J, Chen Y S. Palynological records of Holocene Megathemal in China. *Quaternary Science Reviews*, 1991,10 537—544.

[25] Fang J Y. Re-discussion about the forest vegetation zonation in eastern China. *Acta Bonica Sinica*, 2001, 43 (4) :522—533.

[26] Li D Q, Sun C Y, Zhang X S. Distribution and modeling of potential vegetation productivity in China. *Acta Bonica Sinica*, 1998, 40 (6) :560—566.

参考文献：

[4] 吴征镒. 中国植被. 北京 中国科学出版社,1980. 749 ~ 1037.

[5] 朱志诚. 陕北黄土高原上森林草原的范围. *植物生态学与地植物学丛刊*, 1983, (1) 122 ~ 131.

[6] 史念海. 论历史时期我国植被的分布及变迁. *中国历史地理论丛*, 1991, (1) 43 ~ 73.

[8] 吕厚远, 刘东生, 郭正堂. 黄土高原地质、历史时期古植被研究状况. *科学通报*, 2003, 48 (1) 2 ~ 7.

[8] 赵松乔, 孙惠南, 黄荣金, 等. 现代自然地理. 北京 科学出版社, 1988. 156 ~ 169.

[9] 张新时. 全球变化研究的植被-气候分类系统, 第四季研究, 1993, 2 157 ~ 169.

[0] 任国玉. 中国北方地区的本地植被. *生态学报*, 2004, 24 (6) 1287 ~ 1293.

[4] 王义凤, 肖向明. 黄土高原地区主要植被类型的气候梯度分布. *植物学报*,1993, 35 (4) :291 ~ 299.

[5] 周筠珺, 周立华. 用 Thornthwaite 和 Holdrige 潜在蒸散指数初步分析柴达木地区植被-气候关系. *干旱区研究*, 1996, 13 46 ~ 51.

[5] 方精云. 也论我国东部植被带的划分. *植物学报*, 2001, 43 (4) 522 ~ 533.

[26] 李迪强, 孙成永, 张新时. 中国潜在植被生产力的分布与模拟. *植物学报*, 1998, 40 (6) 560 ~ 566.

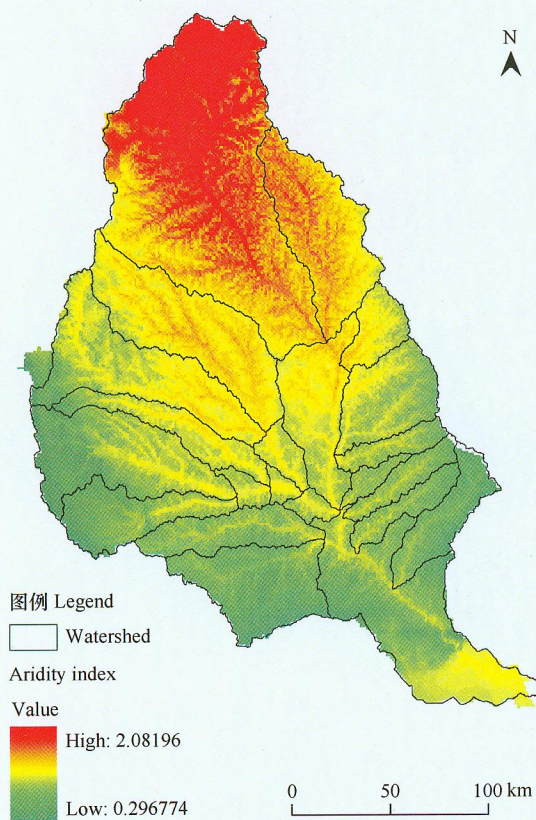


图1 泾河流域干燥指数空间分布
 Fig. 1 Spatial pattern of aridity index in Jinghe River Basin

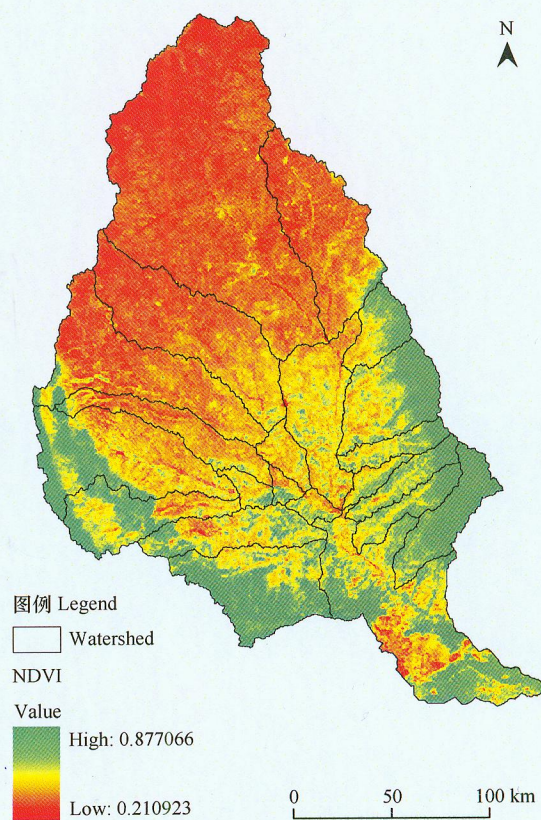


图2 泾河流域植被指数 NDVI 空间分布
 Fig. 2 Spatial pattern of NDVI in Jinghe River Basin

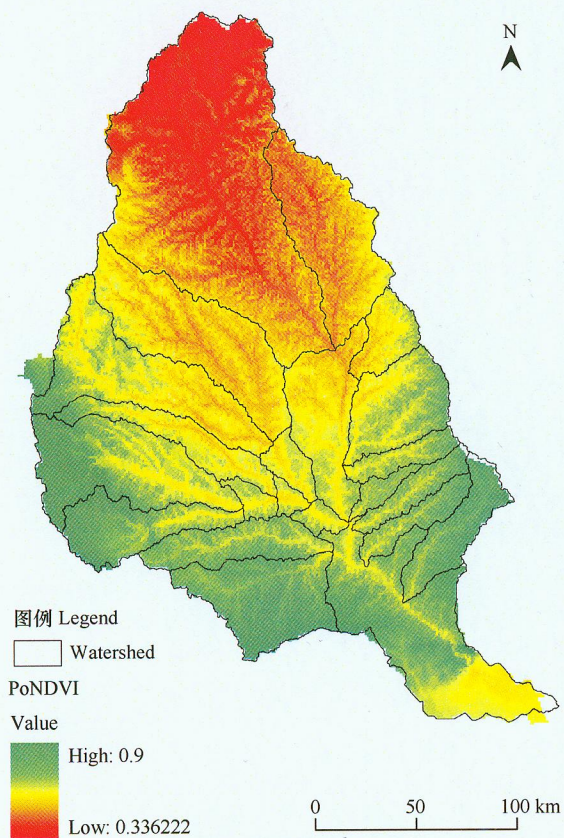


图3 泾河流域潜在植被指数格局
 Fig. 3 Spatial pattern of potential vegetation index in Jinghe River Basin

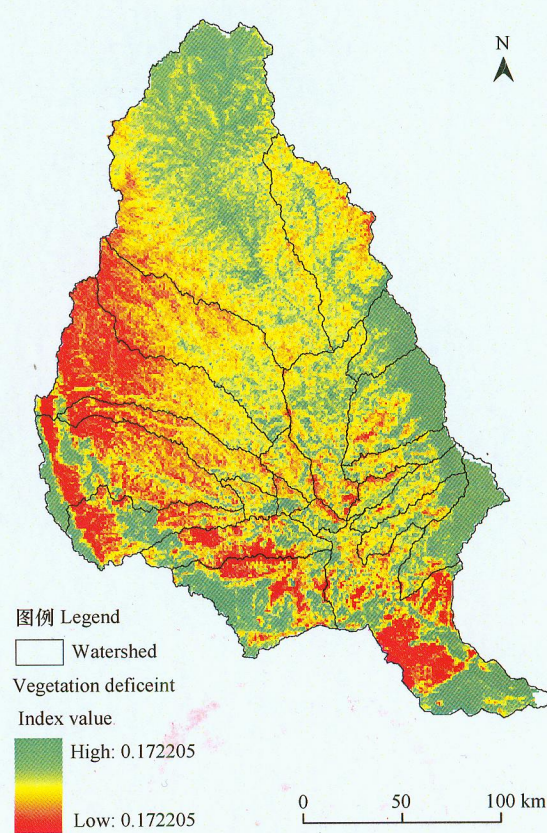


图4 泾河流域植被冗余指数格局
 Fig. 4 Spatial pattern of vegetation redundant-deficient index in Jinghe River Basin