

青藏高原高寒区生态脆弱性评价

于伯华, 吕昌河

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 在分析青藏高原高寒生态系统形成机制的基础上, 构筑了 3 个层次、10 个指标的脆弱性评价指标体系, 系统评估了青藏高原生态脆弱性及其区域差异。研究结果表明: 青藏高原中、重度以上脆弱区的面积较大, 占区域总面积的 74.79%。微度、轻度脆弱区主要分布在雅鲁藏布江大拐弯处、藏东南海拔 3000m 以下的山地、祁连山南坡的西北段和昆仑山北坡、塔里木盆地南缘地带。重度和极度脆弱区集中分布的趋势明显, 占全区面积的 49.46%, 主要分布在黄河源区、柴达木盆地和阿里高原往东 32°N 附近的带状区域 (78°E~92°E)。研究结果有助于全面掌握青藏高原生态系统的脆弱程度及其空间分异特征, 对识别高寒区关键脆弱环境因子、提高生态环境治理的针对性有重要意义。

关键词: 生态脆弱性; 形成机制; 脆弱度评价; 青藏高原

文章编号: 1000-0585(2011)12-2289-07

1 引言

环境脆弱性评价是诊断区域环境问题^[1]、识别关键脆弱环境因子的重要手段^[2], 也是生态环境整治的必要步骤之一。自生态过渡带 (Ecotone) 的概念提出之后, 生态脆弱性评价始终是脆弱生态环境研究的主要内容之一^[3], 也是国家环境保护规划的重要组成部分。美国环境保护署研究与发展办公室制定了区域脆弱性评估计划 (Regional Vulnerability Assessment, ReVA), 致力于使用现有数据和模型进行环境风险评估^[4]。我国也在 2008 年制订并发布了《全国生态脆弱区保护规划刚要》, 提出了“重点加强生态脆弱区现状调查和基线评估, 制定符合中国国情的生态脆弱区评价指标体系”的近期目标。在脆弱性评价过程中, 单因子评价、多因子综合评价和景观生态学等传统评价方法不断进步和发展^[3,5,6], 为改善生态环境、提高区域持续发展的能力发挥了重要作用。但是, 这些研究共同的不足是脆弱程度往往是对区域整体的描述, 缺乏必要的空间分析和定位, 因此制定的整治对策和措施也有一定的局限性。

青藏高原介于 26°00'12"N~39°46'50"N、73°18'52"E~104°46'59"E 之间, 面积为 257.24×10⁴km², 占我国陆地总面积的 26.8%^[11], 是我国最大的生态脆弱区。青藏高原具有海拔高、气温低、降水少、生态系统结构简单、抗干扰能力弱和易受全球环境变化影响的特点, 表现出较强的脆弱性。但是, 由于青藏高原自然条件和社会经济发展水平差异显著, 植被等自然和社会因子的空间分布及其变化都具有明显的地域分异特征^[12,13], 脆

收稿日期: 2011-04-25; 修订日期: 2011-07-23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2009CB421307, 2012CB955304); 中国科学院知识创新工程领域前沿项目 (Y0V00230ZZ); 国家科技攻关计划 (2006BAC01A01-02)

作者简介: 于伯华 (1974-), 男, 山东枣庄人, 助理研究员, 博士, 主要从事土地利用与环境整治研究。

E-mail: yubh@igsnr.ac.cn

弱性也必然存在显著的空间差异。本研究在分析高原生态系统脆弱性形成机制的基础上,采用多源数据和空间分析技术,对青藏高原脆弱性及其区域差异进行了系统评估。研究结果对识别关键脆弱环境因子、提高生态环境治理的针对性具有重要意义。

2 高寒脆弱生态系统的形成机制

脆弱生态系统的形成因素按其性质可分为自然因素和人为因素两个方面,但究竟哪个方面为主存在相异的观点。有的认为,生态系统是否脆弱主要决定于自然因素;有的认为,脆弱性是生态系统相对人的“利用性”而言的,不可利用的和承受人类活动的生态系统就没有“脆弱性”可言^[14]。还有的认为环境之所以“脆弱”,是因为人类活动的干扰强度超过了生态系统的承受能力,使生态环境出现了退化^[15]。综合来说,自然因素和人为因素是脆弱生态系统形成的两个基本条件,没有自然环境“先天的”不稳定和人类活动“后天的”超负荷干扰,生态环境的脆弱性就无从谈起。

青藏高原高寒脆弱生态系统的形成是由地球内力、气候和人类活动等多重因素共同造成的。高原 80% 以上的面积在海拔 4000m 以上,气温显著低于同纬度地区,形成“世界第三极”。青藏高原南部及东南部边缘区降水较多,而广大的高原腹地,由于深居内陆,降水量多在 200mm 以下,干旱特征明显。土壤发育历史短,成土母质以冰碛物、残积—坡积物为主,使得高原 71.67% 面积的为高山土覆盖,土壤普遍具有粗骨性强、抗蚀能力弱的特点。植被以高寒草甸、草原为主,结构单一;低温缺水更使得草地生产力低、更新缓慢^[16]。这些因素决定了高寒区生态系统的本底质量差,对外部干扰响应敏感,容易出现退化现象。

人类活动扰动改变了生态系统的稳定状态,加剧了高原局部的和短期的变化,成为区域生态退化的主要原因^[17]。超载过牧是人类活动中引起草地退化第一位的原因,藏北高原超载率就达 59.18%^[18]。另外,矿产资源开采和生物、旅游资源开发等人类经济活动也给草原生态带来严重的破坏,使得局部地区出现了草地退化、湿地消失、土地沙化等现象。

气候是最基本的环境因子,全球气候变化影响生态系统的脆弱性^[19,20]。青藏高原气候严酷、自然条件恶劣,系统中的关键环境因子常常处于临界状态,抗干扰能力差,因此气候变化势必会对区域环境产生影响,引起高原生态系统的格局、过程与功能发生变化。观测到的证据已经证实全球气候变化导致高原冰川加速消退^[21]、冻土层厚度和深度以及湿地的范围发生改变^[22],对高寒脆弱生态系统产生了缓慢但整体而长远的影响。

3 评价指标筛选与处理

首先从区域生态问题出发,找出导致这些生态问题出现的根本原因及其影响因素,筛选生态脆弱性的影响因子。评价采用加权赋值法,即根据脆弱评价因子对生态系统脆弱性的贡献确定权重,进而计算脆弱度。

3.1 评价指标及数据处理

在全面考察区域脆弱性状况的基础上,依据生态问题—环境因子—评价指标的途径筛选设计了 3 个层次共 14 个评价指标。比如,青藏高原东南缘存在水土流失问题,与水蚀有关的环境因子为地形地貌、植被和降水,则其对应的指标为坡度、植被类型、植被盖度和降水量;与风蚀有关的环境因子有地形地貌、植被状况和风速,对应的指标为粗糙度、

植被盖度和平均风速。然后按环境因子进行归类。最后，遵循主导因素原则、系统性原则和可操作性原则，保留了独立性强的 10 个指标。

地形：选取坡度和地面粗糙度作为代表性指标。坡度计算以 90m 空间分辨率的 DEM 数据为数据源，通过 Spatial Analyst 模块中的 Surface Analysis 命令计算；粗糙度是在坡度的基础上，使用 Raster Calculator 计算。

气候：根据对区域生态系统的影响程度，选择 0°C 积温、干燥度和平均风速作为气候脆弱性的评估指标。数据来自位于青藏高原的 90 余个国家基本气象站点逐日观测数据。干燥度采用彭曼公式计算。

植被：反映区域植被状况的指标主要有植被类型和植被盖度。植被类型划分依据我国 1:100 万植被类型图。根据不同植被类型对生态系统稳定性的贡献，按照林、灌、草、高山植被、沼泽和栽培植被、荒漠植被分别赋值为 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0，数值越大，说明抗干扰能力越弱，系统脆弱性越高。使用植被指数 (NDVI) 来反映植被盖度的差异，数据来自 1km 分辨率的 MODIS NDVI；利用最大值法求取 2008 年的植被指数来反映当年的植被盖度。

人类干扰：包括人口压力、经济活动强度和畜牧压力等，分别用人口密度、道路密度、单位土地面积载畜量来表示。青藏高原地区的主要牧畜包括牦牛、马、羊等，按照 1 头大牲畜折 5 只羊的比例，将载畜量换算成“羊单位”，方便不同区域的对比分析。

3.2 数据标准化及指标权重确定

3.2.1 数据处理 参评因子量纲及其物理意义不尽相同，必须采用统一的方法对数据进行归一化处理。评价指标体系中有两种数据类型：一种是不连续数据，如植被类型；另一种是连续数据，如植被盖度 (0, 1)。对于不连续数据按照等差方法直接赋值至 0 到 1 之间。对于连续数据采用极值法对数据进行归一化处理，将不同量纲、不同取值范围的所有指标统一到 (0, 1) 之间。对于符合脆弱性总体评价目标的“正向”指标，

直接采用归一化之后的数值；对于“反向”指标，则利用 1 减去归一化之后的数值，获得符合总体评价目标的因子得分。所有的指标均转换成 $1\text{km}\times 1\text{km}$ 的网格数据。

3.2.2 指标权重 综合考虑特尔斐方法、层次分析法、专家问卷调查法等方法的优缺点和适用性，采用层次分析方法确定因子权重。首先构筑系统结构层次，建立因子之间的相对重要性关系矩阵，经计算获得参评指标的综合权重 (表 1)。其中，B 层因素的一致性指标 CI 、平均随机一致性指标 RI 和随机一致性比率 CR 分别为 0.003、0.424、0.007，最大特征值为 4.011，通过一致性检验；C 层的评价指标通过了一致性检验。

表 1 高寒脆弱生态评级指标体系及权重
Tab 1 Index and their weighing for assessment of ecological vulnerability

A 层	B 层			C 层			综合权重
	名称	代码	权重	名称	代码	权重	
高寒脆弱生态评价	地貌	B1	0.089	坡度	C1	0.750	0.067
				地面粗糙度	C2	0.250	0.022
				0°C 积温*	C3	0.297	0.126
	气候	B2	0.423	干燥度	C4	0.540	0.228
				平均风速	C5	0.163	0.069
	植被	B3	0.152	植被类型	C6	0.667	0.101
				植被盖度*	C7	0.333	0.051
				人口密度	C8	0.163	0.055
	人类干扰	B4	0.336	道路密度	C9	0.297	0.100
				载畜量	C10	0.540	0.181

注：标记星号 (*) 的为“反向”指标。

为 0.003、0.424、0.007，最大特征值为 4.011，通过一致性检验；C 层的评价指标通过了一致性检验。

4 脆弱性空间分布

全区脆弱度差异较大,最低值为 0.13,最高值为 0.61,平均值 0.36。为更好的表述高寒生态系统脆弱性的空间分布,在 ArcGIS 中利用自然间断点分级法,将全区所有的栅格按照脆弱度的大小分成五个等级:微度、轻度、中度、重度和极度(图 1);然后根据空间分布划分不同等级的脆弱区。

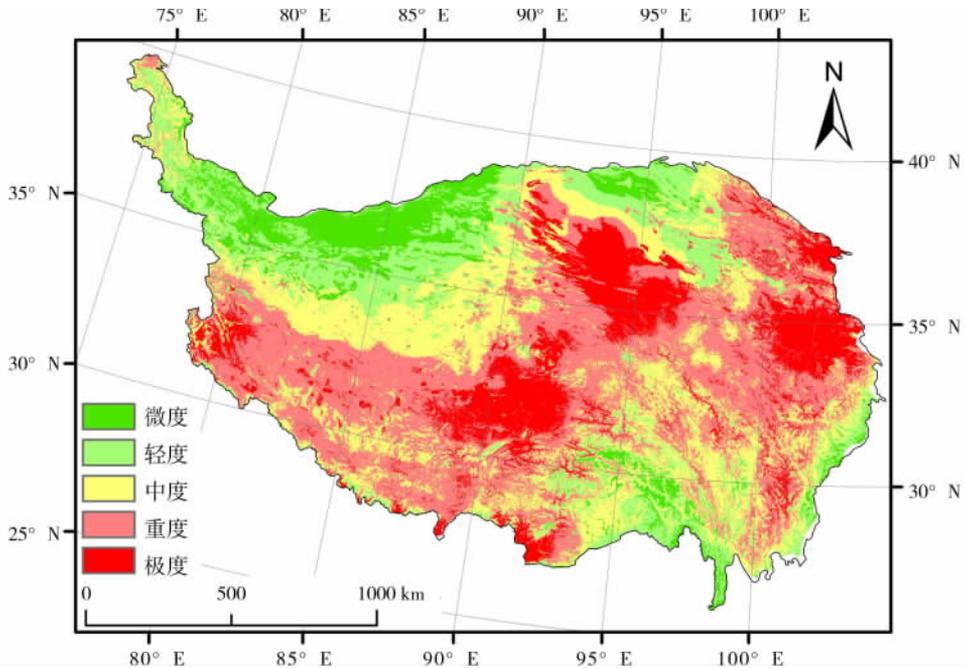


图 1 高寒生态脆弱度分区

Fig. 1 Classification of ecological vulnerability on Tibetan Plateau

4.1 微度、轻度脆弱类型区

微、轻度脆弱类型的面积为 64.85×10^4 km², 占区域总面积的 25.21% (表 2)。从空间分布上,微度、轻度脆弱区有四个:雅鲁藏布江大拐弯处、青藏高原东南缘海拔在 3000m 以下的区域、祁连山南坡的西北段、昆仑山北坡、塔里木盆地南缘的山麓/山坡地带。

在雅鲁藏布江大拐弯,纬度较低, 0℃积温通常在 4000℃左右;河谷向南开口,来自印度洋的暖湿空气可顺河谷从海拔低的地区向上游输送,降雨量可达 600mm 以上;植被以森林为主,覆盖度高,植被指数在 0.7~0.9 之间,该区域的微度和轻度脆弱区共同形成“三角形”深入青藏高原。

在青藏高原的东南部,尽管该区域坡度较大、易发生水土流失等环境问题,但是受季

表 2 脆弱等级面积统计

Tab 2 Area and ratio of different grades

	脆弱度范围	比例 (%)	面积 (10 ⁴ km ²)
微度	0.13~0.27	8.53	21.95
轻度	0.27~0.33	16.68	42.90
中度	0.33~0.37	25.33	65.16
重度	0.37~0.41	34.55	88.88
极度	0.41~0.61	14.91	38.35

风的影响，来自太平洋的湿热空气也可以顺横断山区的河谷向上输送，使得该区域的 0°C 积温通常在 3000°C 以上、降雨量在 $300\sim 600\text{mm}$ 之间；同时受高差的影响，形成了河谷低地以森林植被为主、高海拔处以草地为主的垂直地带性特征。

祁连山南坡西北段脆弱度也较低，降雨量在 $350\sim 700\text{mm}$ 之间，干燥度在 $3\sim 5$ 之间， 0°C 积温在 3000°C 左右，植被以林草为主。在昆仑山的北坡、塔里木盆地南缘 0°C 积温在 4000°C 左右；植被盖度差异较大，既有植被指数为0的无植被区，也有植被指数0.6以上的林地，与区域荒漠绿洲的自然景观相一致。

4.2 中度脆弱类型区

从面积及其所占的比例来看，中度脆弱面积较大，为 $65.16\times 10^4\text{km}^2$ ，占区域总面积的25.33%。分布在藏北高原的中北部和青藏高原中东部的河源区。藏北高原中北部地区属于高原寒带季风干旱气候，最暖月平均气温在 6°C 以下， 0°C 积温多维持在 2000°C 左右，年降水量 $100\sim 150\text{mm}$ 之间。低温缺水的气候形成了以荒漠为主的典型植被；植被生长缓慢，植被指数在 $0.1\sim 0.2$ 之间。该区地广人稀，人类活动对区域生态环境变化尚未产生明显的影响，大部分地区依然保持着原始状态。但是该区域的生态系统结构简单，易受人类活动和气候变化等因素的影响后，极易产生退化，且恢复困难。

在青藏高原的中东部地区，生态脆弱性表现基本一致。但是，该区域高山与深谷相间分布，自然环境和社会经济条件在水平和垂直方向上变异均比较大。该区域干燥度在 $1\sim 3$ 之间， 0°C 积温在 $1000\sim 4000^{\circ}\text{C}$ 之间，道路密度在 $5\sim 10\text{ km}/\text{km}^2$ 之间；载畜量在 $50\sim 100$ 个羊单位之间；植被从林地到灌丛、再到草地均有分布，植被指数在 $0.4\sim 0.8$ 之间；另外，该区域的气温和降水年际变化也较大。因此，该区域的生态环境整治不仅仅要关注脆弱生态环境的整体状况，更要关注单一脆弱因子对生态环境治理的抑制作用。

4.3 重度、极度脆弱区

重度和极度脆弱区在青藏高原占有较大比重，面积约为 $127.23\times 10^4\text{ km}^2$ ，占49.46%。两者集中分布于黄河源区、柴达木盆地和阿里高原往东的北纬 32° 附近的带状区域（ $78^{\circ}\text{E}\sim 92^{\circ}\text{E}$ ）。黄河源区集高寒、冻土、冰川与湿地为一体，平均海拔 4000 m 左右。由于黄河源区深居内陆，东南季风的湿热气流影响微弱而西伯利亚寒流却可以沿河西走廊南下，使得该区域气候寒冷干燥，年平均气温在 $-4^{\circ}\text{C}\sim 0^{\circ}\text{C}$ 之间；风蚀作用强，降水量少而变化率大，年降水量为 $220\sim 350\text{mm}$ ，土壤以高山草甸土为主，土层薄、质地粗、保水性能差。

柴达木盆地降水稀少，多在 $50\sim 100\text{mm}$ 之间，至多不超过 200mm ，干燥度在 $20\sim 40$ 之间； 0°C 积温在 $1500\sim 2500^{\circ}\text{C}$ 之间。大部分地区植被稀疏，为荒漠草原景观，植被指数为 $0\sim 0.3$ 之间。盆地风蚀作用较强，植被破坏后，很容易发生沙化且恢复困难。

阿里高原往东的带状区域属于青藏高原腹地，降水稀少，气候干旱，年降水量多在 $100\sim 300\text{mm}$ 之间；再加上海拔较高，气温常年比较低，形成以荒漠、草甸为主的自然景观，植被指数多在 $0.1\sim 0.4$ 之间，植被盖度较低。

5 结论与讨论

在分析青藏高原脆弱生态形成机制的基础上，设计了包含地貌、气候、植被、人类干扰在内的3个层次、10个评价指标，评价了青藏高原的生态脆弱度及其空间分布特征，研究结果可加深区域生态脆弱性的认识。

从面积上来看,青藏高原整体上脆弱度较高,且中、重度以上脆弱区的面积大。从空间分布上,微度、轻度脆弱区主要分布在雅鲁藏布江大拐弯处、藏东南海拔 3000m 以下的山地、祁连山南坡的西北段和昆仑山北坡、塔里木盆地南缘地带。中度脆弱区面积占全区的 25.33%,主要分布在藏北高原的中北部和青藏高原中东部大江大河的河源区。重度和极度脆弱区集中分布的趋势明显,面积接近全区面积的一半;主要分布在黄河源区、柴达木盆地和阿里高原往东、北纬 32°附近的带状区域(78°E~92°E)。

全球气候变暖影响生态系统的抗干扰能力,对脆弱生态系统的影响会更加明显^[23]。但是,由于青藏高原面积广大、区域气候变化差异显著,因此全球变暖究竟在多大程度上影响了生态系统脆弱性还存在太多的不确定性。比如,气温升高既有可能提高区域蒸散发,不利于植被的生长;又可以延长植被生长周期,并有可能提高降水量和河流冰川补给,从而地表植被的生产力相应提高。因此,生态脆弱性评价中没有将气候变化纳入评价指标中。

参考文献:

- [1] Nelson R, Kocik P, Crimp S, *et al.* The vulnerability of Australian rural communities to climate variability and change: Part II—Integrating impacts with adaptive capacity. *Environmental Science & Policy*, 2010, 13(1): 18~27.
- [2] Metzger M J, Rounsevell M D A, Acosta-Michlik L, *et al.* The vulnerability of ecosystem services to land use change. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2006, 114(1): 69~85.
- [3] Li L, Shi Z H, Zhu D, *et al.* Regional assessment of eco-environmental vulnerability based on GIS: A case study of Hubei Province, China. 2009 International Conference on Environmental Science and Information Application Technology, Vol I, Proceedings, 2009, 2(1): 175~178.
- [4] Bradley M P, Smith E. Using science to assess environmental vulnerabilities. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2004, 94(1-3): 1~7.
- [5] 田亚平,刘沛林,郑文武. 南方丘陵区生态脆弱度评估——以衡阳盆地为例. *地理研究*, 2005, 24(6): 843~852.
- [6] Metzger M J, Leemans R, Schrter D. A multidisciplinary multi-scale framework for assessing vulnerabilities to global change. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2005, 7(4): 253~267.
- [7] Wang X D, Zhong X H, Liu S Z, *et al.* Regional assessment of environmental vulnerability in the Tibetan Plateau: Development and application of a new method. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72(10): 1929~1939.
- [8] Olafsdottir R, Runnstrom M C. A GIS approach to evaluating ecological sensitivity for tourism development in fragile environments: A case study from SE Iceland. *Scandinavian Journal of Hospitality and Tourism*, 2009, 9(1): 22~38.
- [9] 彭晚霞,王克林,宋同清,等. 喀斯特脆弱生态系统复合退化控制与重建模式. *生态学报*, 2008, 28(2): 811~820.
- [10] 董锁成,吴玉萍,王海英. 黄土高原生态脆弱贫困区生态经济发展模式研究——以甘肃省定西地区为例. *地理研究*, 2003, 22(5): 590~600.
- [11] 张锦锂,李炳元,郑度. 论青藏高原范围与面积. *地理研究*, 2002, 21(1): 1~8.
- [12] 于伯华,吕昌河,吕婷婷,等. 青藏高原植被覆盖变化的地域分异特征. *地理科学进展*, 2009, 28(3): 391~397.
- [13] 冯新灵,罗隆诚,邱丽丽,等. 青藏高原至中国东部年雨日变化趋势的分形研究. *地理研究*, 2007, 26(4): 835~843.
- [14] 冉圣宏,曾思育,薛纪渝. 脆弱生态区适度经济开发的评价与调控. *干旱区资源与环境*, 2002, 16(3): 1~6.
- [15] 钱拴,毛留喜,侯英雨,等. 青藏高原载畜能力及草畜平衡状况研究. *自然资源学报*, 2007, 22(3): 389~397, 498.

- [16] 吕昌河, 于伯华编著. 青藏高原土地退化整治技术与模式. 北京: 科学出版社, 2011. 1~192.
- [17] Li X Y, Ma Y J, Xu H Y, *et al.* Impact of land use and land cover change on environmental degradation in Lake Qinghai Watershed, Northeast Qinghai-Tibet Plateau. *Land Degradation & Development*, 2009, 20(1): 69~83.
- [18] 边多, 李春, 杨秀海, 等. 藏西北高寒牧区草地退化现状与机理分析. *自然资源学报*, 2008, 23(2): 254~262.
- [19] Young G, Zavala H, Wandel J, *et al.* Vulnerability and adaptation in a dryland community of the Elqui Valley, Chile. *Climatic Change*, 2010, 98(1): 245.
- [20] Lioubimtseva E, Henebry G M. Climate and environmental change in arid Central Asia: Impacts, vulnerability, and adaptations. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73(11): 963~977.
- [21] 刘时银, 丁永建, 李晶, 等. 中国西部冰川对近期气候变暖的响应. *第四纪研究*, 2006, 26(5): 762~771.
- [22] 王根绪, 李元首, 吴青柏, 等. 青藏高原冻土区冻土与植被的关系及其对高寒生态系统的影响. *中国科学: 地球科学*, 2006, 36(08): 743~754.
- [23] 李克让, 曹明奎, 於琍, 等. 中国自然生态系统对气候变化的脆弱性评估. *地理研究*, 2005, 24(5): 653~663.

Assessment of ecological vulnerability on the Tibetan Plateau

YU Bo-hua, LU Chang-he

(Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Unstable natural factors and pressures from human activities determine the ecological vulnerability of the Tibetan Plateau. This paper analyzed the factors and mechanism of ecological vulnerability, and developed an index system comprising 3 levels and 10 indicators for the vulnerability assessment. Using multi-source data and ArcGIS spatial analysis tools, this study quantitatively evaluated the degree and its spatial variation of ecological vulnerability on the Tibetan Plateau, based on the above index system. The results show that most parts of the Tibetan Plateau is ecologically fragile, with 74.79% of the area belonging to moderate to extreme-level vulnerability. The map and data of vulnerability classification indicate that the slight and light-level vulnerability area covers 8.33%, which are mainly distributed in the relatively low mountain areas below 3000 m in southeastern Tibet, the northwestern part of the Qilian Mountains, the northern slope of the Kunlun Mountains and the southern margin of the Tarim Basin; the moderate-level vulnerability area occupies more than 25.33%, mainly on the north and central Tibetan Plateau and the source region of the Yangtze, Lancang and Yellow rivers; while the heavy and extreme-level vulnerability area covers 49.46%, mainly concentrated in the source region of Yellow River, Qaidam Basin and the zone along 32°N (from 78°E to 92°E). The results contribute to understanding the extent of ecological vulnerability and its spatial difference on the Tibetan Plateau, and help to identify environmental problems, the key fragile factors and measures for ecological protection and rehabilitation in this region.

Key words: ecological vulnerability; formation mechanism; vulnerability assessment; Tibetan Plateau