

农户尺度的黄土高原乡村干旱脆弱性及适应机理

石育中,王 俊,王子侨,鲁大铭,杨新军*

(西北大学城市与环境学院,西安 710127)

摘 要:干旱脆弱性及人类对干旱的适应机理分析是干旱及半干旱地区人地关系研究的重要内容,也是西北地区乡村人地系统可持续性研究的新视角。本文运用Turner脆弱性分析框架,将其改进应用到黄土高原乡村农户的干旱脆弱性及其适应领域,选取榆中县和长武县气象数据和农户调查数据,应用主成分分析、综合指数法、差异性分析和鲁棒性分析等方法分别对指标权重、农户干旱脆弱性指数及其差异性与脆弱性指数的不确定性进行分析与检验,并从适应能力、适应策略和适应模式三个层面揭示适应机理。主要结论为:①中连川乡农户干旱脆弱性指数大于洪家镇,且不同村落间农户干旱脆弱性指数差异显著;②农户干旱适应机理为暴露—敏感性影响农户收入,农户生计系统是适应干旱暴露扰动的决定因子,农户类型、生计方式、土地利用、灌溉设施和政策扶持的差异性产生不同的适应模式和适应效果;③农户干旱脆弱性指数排名出现频率较高且排名变化范围较小,具有较强的鲁棒性,表明农户干旱脆弱性计算结果具有稳健性。

关 键 词:农户干旱脆弱性;适应机理;鲁棒性分析;黄土高原

1 引言

随着全球变暖,干旱区面积及干旱发生率逐步增加,严重威胁着人类赖以生存的粮食、水资源和生态环境,对人地耦合系统可持续性产生巨大影响(程静等, 2010; 何斌等, 2010; 高超等, 2012; Wu et al, 2013; 邱海军等, 2013)。人地耦合系统脆弱性研究作为未来地理科学研究领域的十大科学研究命题之一,已逐渐成为人地关系研究和区域可持续发展较为重要的科学知识体系,而干旱脆弱性研究作为研究人地耦合系统脆弱性的最新热点内容,在地理学领域已引起广泛关注(高超等, 2012; Tánago et al, 2016)。干旱脆弱性是人地系统中自然、社会与

经济多重要素遭受干旱扰动而影响人地系统应对干旱能力的状态,是理解人地耦合系统对干旱在何时(When)脆弱,为何(Why)脆弱,如何(How)做和做什么(What)可降低脆弱的重要途径(Naumann et al, 2013; Tánago et al, 2016; Thomas et al, 2016)。干旱脆弱性评价逐渐成为制定干旱减缓和预防政策的首要环节(Derbile, 2013),旨在减缓、预备和提前预警干旱以将受影响程度降至最低。

随着干旱脆弱性研究的不断深入,诸多学者开始关注干旱对乡村人地系统的胁迫与影响,农户作为该系统中最主要的经济活动主体以及自然资源利用的最直接单元,已成为干旱扰动的最直接承受者,干旱对其生计造成的影响尤为严重(Wittrock et

收稿日期:2017-02;修订日期:2017-09。

基金项目:教育部人文社会科学研究项目(12YJC840040);国家自然科学基金项目(41571163);陕西高校人文社会科学青年英才支持计划项目[Foundation: Humanities and Social Sciences of Ministry of Education Fund, No.12YJC840040; National Natural Science Foundation of China, No.41571163; Humanities and Social Science Talent Plan in Shaanxi Province]。

作者简介:石育中,男,甘肃陇南人,博士生,从事人地耦合系统脆弱性与区域可持续发展研究,E-mail: syz19880919@126.com。

通讯作者:杨新军(1972-),男,陕西扶风人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为旅游地理学与人地关系的社会—生态整合研究,E-mail: yangxj@nwu.edu.cn。

引用格式:石育中,王俊,王子侨,等. 2017. 农户尺度的黄土高原乡村干旱脆弱性及适应机理[J]. 地理科学进展, 36(10): 1281-1293. [Shi Y Z, Wang J, Wang Z Q, et al. 2017. Rural household vulnerability to drought and adaptation mechanism on the Loess Plateau[J]. Progress in Geography, 36(10): 1281-1293.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2017.10.010

al, 2011; Ashraf et al, 2014),并将农户干旱脆弱性定义为:农户因各种自然与社会经济因素制约造成的易于遭受旱灾损失和影响的属性,是乡村人类—环境耦合系统交互影响的结果。脆弱程度的变化受到自然环境、气候环境与社会经济因素的综合影响(Ashraf et al, 2014; Lei et al, 2014)。西北黄土高原地区乡村经济主要依赖雨养农业,且农户集依赖型生计方式、高密度贫困集聚区与低适应能力于一身,干旱导致地表水和地下水锐减,从而影响农业种植业和生产效率,对农户生计安全形成巨大挑战,影响乡村人地系统的可持续发展(鲍超等, 2008; 李芬等, 2011; Ashraf et al, 2014)。就农户干旱脆弱性研究进展而言,国外学者已在不同发展中国家乡村人地系统开展相关研究(Lindoso et al, 2014; Fang et al, 2016; Hung et al, 2016),而国内农户干旱脆弱性研究还处于起步阶段,基于农户尺度的干旱脆弱性研究更是屈指可数。

纵观农户干旱脆弱性研究,主要存在以下问题:脆弱性分析框架与指标体系不够统一;标准化和指标权重赋值方法多样,导致干旱脆弱性结果具有不确定性;重视干旱脆弱性空间分异而忽视其内部作用机制与内部要素的变化(Wu et al, 2013)。此外,脆弱性分析框架无法深入解释社会经济系统如何适应和缓解外部扰动的影响,而“适应”力图分析系统适应变化及抵抗干扰的能力,逐渐成为推动社会经济系统可持续发展的一种新理念(郭永锐等, 2015)。针对以上问题,本文选择位于陕甘黄土高原西部和南部的榆中县中连川乡和长武县洪家镇作为研究区,试图将Turner的脆弱性分析框架运用到农户尺度,应用综合指数法对农户干旱脆弱性加以量化;运用鲁棒性分析对由数据标准化方法、权重赋值及脆弱性计算公式差异产生的不确定性结果进行检验;通过对农户适应能力和适应机制的剖析,深入理解农户对干旱的脆弱性及其存在的差异;通过对脆弱性结果的不确定性分析而完善脆弱性评价的框架,厘清和理解脆弱性与适应能力在农户尺度的相互关系,为人地耦合系统脆弱性理论的深化提供新的思路,并为黄土高原干旱—半干旱区制定干旱适应及早灾减灾防灾政策和精准扶贫提供理论依据与借鉴。

2 研究区域、数据来源与研究方法

2.1 研究区域

陕西省长武县洪家镇地处黄土高原南部丘陵沟壑区(图1),为暖温带半湿润大陆性气候,年均气温 9.4°C ,年均降水量 597.5 mm (图2),多集中在7–9月且年变率大,多年平均无霜期为171天,复种指数一般达115%。该镇是一个生态脆弱、人类活动强度高的生态经济复合区域,其农业经济的产业基础是苹果种植业(蒋维等, 2011)。甘肃省榆中县中连川乡地处陇中黄土高原丘陵区,总面积 228 km^2 ,全乡地势西高东低,平均海拔 2344 m ,年降水量 387.8 mm ,年均气温 6.9°C (图2),蒸发量高达 1450 mm ,全年无霜期148天,属典型的半干旱气候。该乡是甘肃省最贫困的山区乡镇之一,为旱地雨养农业,主要农作物有玉米、马铃薯、小麦等(杨新军等, 2015)。

选择位于陕甘黄土高原西部和南部的榆中县中连川乡和长武县洪家镇作为研究区,其典型性在于干旱缺水一直是黄土高原地区人地系统最主要的外部干扰因素,先天脆弱的自然生态系统与人类长期不合理的活动叠加导致生态环境恶化和农民贫困问题突出(马琼等, 2014)。洪家镇和中连川乡分别位于黄土高原南部和中部,均为国家级贫困县

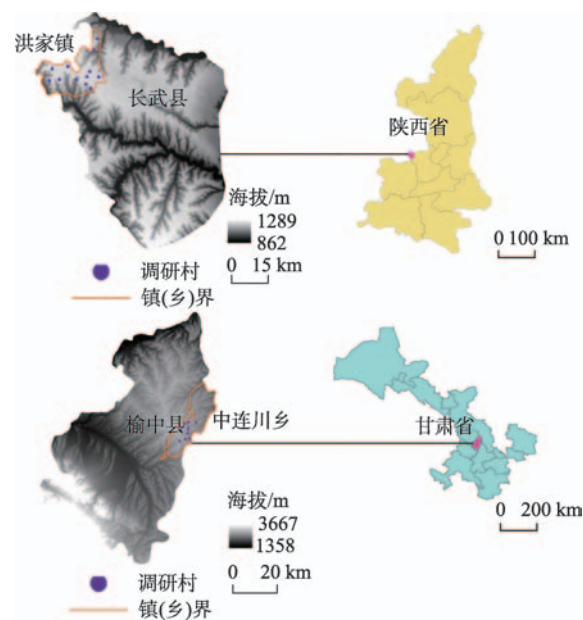


图1 研究区与调研村地理位置^①

Fig.1 Location of the study area and the survey villages

^①研究区与调研村位置图中数据DEM数据源自地理数据云平台,空间分辨率30 m。

和生态脆弱区,共同遭受干旱的胁迫,而且1960-2015年间,年平均降雨量和年最长连续为降水天数变化波动较大(图2),严重影响苹果产业和粮食作物的产量,使得农户生计安全面临重大威胁。由于乡村人地系统对干旱的脆弱性和适应能力存在地理差异性(Naumann et al, 2013; Lei et al, 2014),洪家镇和中连川乡在干旱程度、经济结构、基础设施和灌溉条件存在差异,导致农户干旱脆弱的程度、适应能力、适应策略及适应机理也不相同。本文试图识别黄土高原乡村人地系统对干旱的脆弱状态,揭示黄土高原乡村人地系统脆弱性的异质性,并探索农户对干旱的适应机理,为黄土高原乡村的可持续发展与政策制定提供理论依据。

2.2 数据来源

本文数据包括气象数据和调查问卷数据两部分。其中,气象数据源自中国气象科学数据共享服务网,主要包括长武县与榆中县气象站点1960-2015年间的降水量和气温数据,由于洪家镇与中连川乡未设立气象监测站点,因此采用长武县与榆中县站点气象数据进行替代。

调查问卷数据源自实地调研,调查问卷的设计以已有研究成果为依据,借鉴课题组在研究区的前期实地调研经验^②,设计农户访谈问卷。实地调研于2014年8月分别对洪家镇和中连川乡的现场调研,分别采取系统采样和随机抽样乡对21个村^③进行入户访谈,通过与其进行半结构式访谈获得的第一手数据,回收问卷419份,获得有效问卷387份,

有效问卷率为92.4%,其中,长武县洪家镇调研12个村,回收问卷294份,获得有效问卷273份,有效问卷率为92.9%;中连川乡由于受地形影响,农户居住分散,访谈难度较大,实地调研9个村,回收问卷125份,获得有效问卷114份,有效问卷率为91.2%。调查内容包括:①家庭基本信息。包括家庭人数、职业、教育程度、劳动力等;②自然资本。包含耕地面积、粮食产量、养殖规模等;③物质资本。包含住房质量,家电数量,电话数量,与道路的距离等;④社会资本。包含家庭成员或亲属中可借款人数及身份,邻里关系及信任程度、信贷途径、社会扶助次数等;⑤金融资本。包含家庭人均收入、家庭存款、生计多样性等。

2.3 研究方法

2.3.1 研究框架的选择

Turner提出的人—环境耦合系统脆弱性分析框架(图3),包含人文条件与环境条件及其相互作用背景下暴露、敏感性和恢复力三方面的内容,并从全球、区域和地方三个尺度分析要素之间的相互作用关系,其中,人—环境耦合系统的人文—环境条件(生物物理资本和社会资本)决定暴露度和敏感性并影响系统的应对机制(Turner et al, 2003; 黄晓军等, 2014)。由于人地系统脆弱性研究主要集中在全球、国家和区域尺度,鲜有微观尺度的研究,亟需从全球和国家等宏观尺度转向地方尺度进行“自上而下”的深入研究,而乡村人地系统则是地方尺度最基础的研究单元 (Lei et al, 2014; Fang et al, 2016)。

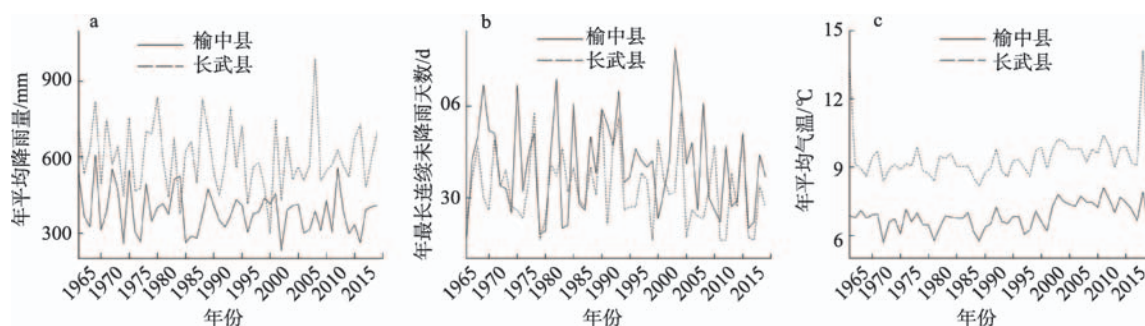


图2 榆中县与长武县气候指标对比

Fig.2 Meteorological condition of Yuzhong County and Changwu County

②洪家镇和连川乡的问卷调查是在课题组前期调研的基础上,针对研究主题进行再研究再设计。洪家镇和连川乡的前期实地调查时间分别为2007年8月和2012年8月。

③21个村由洪家镇12个行政村和中连川乡9个村(行政村+自然村)组成,其中,中连川乡选择行政村+自然村的原因在于海拔较高(2343 m),地形复杂,村落间相隔较远,人口稀少,调研难度较大,而且行政村多以小型规模为主,行政村和自然村人口差别较小。

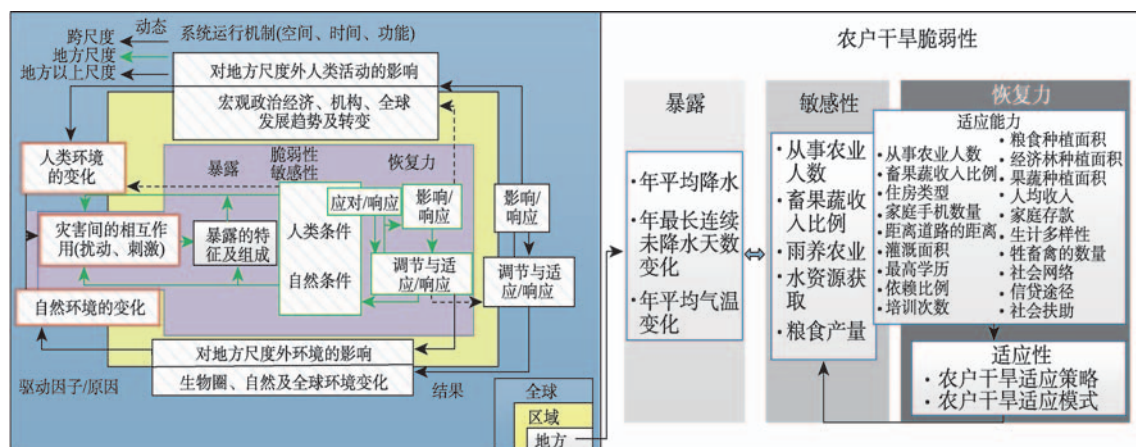


图3 农户干旱脆弱性分析框架

Fig.3 Framework of rural household drought vulnerability assessment

因此,本文以Turner的人—环境耦合系统脆弱性分析框架为基础,选择乡村人地系统基本单元中的农户作为调查和分析对象,以干旱为扰动因素,从暴露、敏感性、恢复力来表征农户干旱脆弱性。由于框架中恢复力内涵在不同地理尺度存在差异,因此在农户尺度需要结合地方特点加以改进,具体改进如下:①Turner认为对外部扰动的应对/响应主要依赖于项目基础、政策和自主选择;然而就农户而言,对外部扰动恢复强弱取决于五大资本的禀赋(Turner et al, 2003; 黄晓军等, 2014);适应能力作为恢复力的重要内容,可结合暴露、敏感性进行脆弱性的量化评价。②就影响/响应而言,Turner认为主要的影响是生命丧失、经济产出、土壤和生态系统服务,除经济产出外,其他指标数据难以获取,因此不作讨论。③就调节与适应/响应而言,Turner认为可通过引进新的项目、政策和自主选择来调节和适应,而对于不同地区,调节和适应存在差异性(Naumann et al, 2013; Lei et al, 2014),从而造成农户的适应策略和模式存在差异。因此,农户尺度的恢复力包含适应能力、适应策略和适应模式三方面内容。

2.3.2 农户干旱脆弱性指标体系的构建

基于文献和实地调研情况,从暴露、敏感性和适应能力三个维度进行构建农户干旱脆弱性指标体系。具体构建过程如下:

暴露(Exposure)是气候条件变化对研究单元造成的压力,可用气候变化特征与气候变化程度如气温、降水等指标表征(Gbetibouo et al, 2009)。选择年平均降水量、最长连续未降水时间和平均年气温来描述干旱的暴露特征,年平均降水量和最长连续未降水时间决定暴露的威胁程度;而平均年气温的

变化能表征干旱的压力(Ashraf et al, 2014)。

敏感性(Sensitivity)是气候事件(Climatic Event)和社会经济系统相互作用的结果,用于表征系统对扰动的敏感性(Susceptibility)(Fang et al, 2016)。选择从事农业人数、畜果蔬收入比例、是否为雨养农业、水资源获取途径和粮食产量衡量敏感性,干旱直接影响农业产量,决定着农业类型和水资源的获取途径(Eakin et al, 2008; Fang et al, 2016; Hung et al, 2016)。

适应能力(Adaptive Capacity)是系统对气候环境扰动的适应(Accommodate)和恢复(Recover)能力,在农户尺度以物质资本、自然资本、金融资本、社会资本和人力资本来表征。其中,物质资本选择住房类型、家庭手机数量、与道路的距离、灌溉面积;自然资本选择粮食种植面积、经济林种植面积、果蔬种植面积;金融资本选择家庭人均收入、存款、生计多样性、牲畜禽的数量;社会资本选择社会网络、信贷途径、社会扶助;人力资本选择最高学历、依赖比例、培训次数(Eakin et al, 2008; Fang et al, 2016; Hung et al, 2016)。

2.3.3 指标标准化方法

选择四分位距(Interquartile Range)的方法进行指标的标准化(Perch-Nielsen, 2010),计算公式如下:

$$X_i = \frac{x_i - \bar{x}_i}{iqr_i} \quad (1)$$

式中: X_i 为标准化后的值; x_i 为指标层指标值; \bar{x}_i 为算数平均值; iqr_i 为四分位距。

2.3.4 农户干旱脆弱性指数

农户干旱脆弱性指数由暴露指数、敏感性指数和适应能力指数组成,但是脆弱性计算存在不同计

算公式,IPCC采用的脆弱性计算公式 $V=E+S-AC$ 受到广泛引用(Piya et al, 2016),因而,选择IPCC提出的脆弱性计算方法;而暴露指数、敏感性指数和适应能力指数由指标标准化值与权重计算获得,指标权重的确定选择主成分分析法。与传统的取相同权重的方法相比,主成分分析可通过统计学流程实现指标降维,更适用于指标权重赋值,在脆弱性的研究中是确定指标权重较为客观的方法之一(Ashraf et al, 2014),具体选取主成分的方差贡献率为权数(刘卫东等, 2009)(表1)。其中,暴露指数提取年平均降水1个主成分,累计贡献率为78%^④;敏感性指数提取粮食产量、获取水资源的途径1个主成分,累计贡献率为69%;适应能力指数指标较多,指标共线性较强,通过指标组合的优化,选择提取存款、生计多样性、社会网络3个主成分,累计贡献率为73%,具体计算公式如下:

$$E_p = \sum_{i=1}^n k_{pi} \times X_i / \sqrt{\lambda_p} \tag{2}$$

$$S_p = \sum_{i=1}^n k_{pi} \times X_i / \sqrt{\lambda_p} \tag{3}$$

$$AC_p = \sum_{i=1}^n k_{pi} \times X_i / \sqrt{\lambda_p} \tag{4}$$

$$FDV = E_p + S_p - AC_p \tag{5}$$

式中:FDV为农户干旱脆弱性指数;E_p是暴露指数;S_p敏感性指数;AC_p适应能力指数;k_{pi}是第p个主成分的相应荷载值;X_i是标准化后的指标值;λ_p是主成分p对应的特征值;n为指标个数。

2.3.5 农户干旱脆弱性指数鲁棒性分析

鲁棒性分析是标准化方法、权重方法和综合指

数计算公式发生变化的情况下能维持综合指数值和排名稳定的方法,是针对综合指标构建过程中的主观选择避免结果不确定性的分析工具,有利于提高综合指数的透明度与可信度(Kondyli, 2010; Singh et al, 2012)。因此,基于本文采用的标准化方法、指标权重赋值方法和农户干旱脆弱性指数计算方法,另外选择Z-score标准化方法,比例法(Scaling)、等权重法(Equal Weight)权重赋值方法,对2种农户干旱脆弱性指数的计算方法进行鲁棒性分析,共计2种标准化方法,3种权重赋值方法,3种农户脆弱性指数计算方法,最终产生18种不同村落农户干旱脆弱性指数结果,以此来检验结果的稳定性。标准化方法和农户干旱脆弱性指数计算公式如下,其中公式变量如式(1)和式(5)所示:

$$X_i = \frac{x_i - \bar{x}_i}{S_i} \tag{6}$$

$$FDV = (E + S - AC) / 3 \tag{7}$$

$$FDV = [E + S + (1 - AC)] / 3 \tag{8}$$

式中: X_i 为标准化后的值; x_i 为指标层指标值; \bar{x}_i 为算数平均值; S_i 为标准差; FDV为农户干旱脆弱性指数; E为暴露指数; S为敏感性指数; AC为适应能力指数。

3 结果分析

3.1 农户干旱脆弱性指数差异性分析

通过模型计算,研究区农户干旱脆弱性值变化范围为[-1.327,4.031](表2),变化幅度较大,洪家镇农户干旱脆弱性指数小于中连川乡,其中,洪家镇

表1 农户干旱脆弱性指标体系

Tab.1 Indicator system of rural household drought vulnerability assessment

维度		初始指标层		优化指标层	权重
暴露	年平均降水			年平均降水	0.63
	年最长连续未降水天数			年最长连续未降水天数	0.61
	年平均气温			年平均气温	0.48
敏感性	粮食产量			粮食产量	0.59
	畜果蔬收入比例			畜果蔬收入比例	0.50
	获取水资源的途径			获取水资源的途径	-0.64
脆弱性	是否为雨养农业				
	适应能力	物质资本	住房条件、家庭手机数量、与道路的距离	住房类型	0.28
		自然资本	粮食种植面积、经济林种植面积、果蔬种植面积、灌溉面积	最高学历	-0.20
		人力资本	最高学历、依赖比例、培训次数	存款	0.22
		金融资本	家庭人均收入、存款、生计多样性、牲畜禽的数量	生计多样性	0.38
		社会资本	社会网络、信贷途径、社会扶助	社会网络	0.19

④一般认为,主成分分析累计贡献率大于60%具备解释力,累计贡献率大于85%则说明解释力较强。

表2 不同村落农户干旱脆弱性指数及其排名

Tab.2 Results and ranking of rural household drought vulnerability in different villages

村名	<i>E</i>	<i>S</i>	<i>AC</i>	<i>V</i>	<i>R_v</i>	村名	<i>E</i>	<i>S</i>	<i>AC</i>	<i>V</i>	<i>R_v</i>
风口村 _洪	0.556	-1.453	0.430	-1.327	1	山兴村 _洪	0.556	-0.990	0.115	-0.549	12
关路村 _洪	0.556	-1.400	0.374	-1.218	2	康家窑 _中	-0.513	-0.229	-0.145	-0.597	13
回朝村 _洪	0.556	-1.348	0.417	-1.209	3	西翻岔 _中	-0.513	0.169	0.001	-0.345	14
王东村 _洪	0.556	-1.404	0.350	-1.198	4	鞑鞑窑 _中	-0.513	1.286	-0.556	1.329	15
公主村 _洪	0.556	-1.351	0.322	-1.117	5	高窑沟 _中	-0.513	1.975	-0.913	2.375	16
上柳村 _洪	0.556	-1.402	0.231	-1.077	6	满都沟 _中	-0.513	2.931	-0.307	2.725	17
庄里村 _洪	0.556	-1.407	0.132	-0.983	7	张家圈 _中	-0.513	2.346	-0.952	2.785	18
姜曹村 _洪	0.556	-1.425	0.102	-0.971	8	坟固湾 _中	-0.513	3.136	-0.541	3.164	19
孔头村 _洪	0.556	-1.357	0.156	-0.957	9	细岭子 _中	-0.513	3.519	-0.488	3.494	20
下柳村 _洪	0.556	-1.359	0.057	-0.860	10	撒拉沟 _中	-0.513	3.949	-0.595	4.031	21
曹公村 _洪	0.556	-1.261	-0.072	-0.633	11						

注:洪代表洪家镇,中代表中连川乡,*E*为暴露指数,*S*为敏感性指数,*AC*为适应能力指数,*V*为脆弱性指数,*R_v*为脆弱性指数排名。

风口村农户干旱脆弱性指数为-1.327,干旱脆弱性最低,中连川乡撒拉沟农户干旱脆弱性指数为4.031,干旱脆弱性最高。在上述两乡镇内部各村差异也较大。如洪家镇在风口村农户干旱脆弱性指数最低的同时,山兴村农户干旱脆弱性指数达-0.549,干旱脆弱性最高;中连川乡在撒拉沟村农户干旱脆弱性指数最高的同时,康家窑村农户干旱脆弱性指数仅为-0.597,干旱脆弱性最低。

就暴露而言,洪家镇村庄干旱暴露指数为0.556,中连川乡干旱暴露指数为-0.513,洪家镇高于中连川乡;就敏感性而言,洪家镇干旱敏感性指数为-1.346,中连川乡2.120,中连川乡高于洪家镇。其原因在于人地耦合系统的地理环境决定着敏感性,相比洪家镇而言,中连川乡地形复杂,且海拔较高,耕地资源丰富,农业用水仅靠自然降水,为典型的雨养农业,干旱的产生直接影响农业产量,造成农业收入的损失;就适应能力指数而言,洪家镇适应能力指数0.218,中连川乡适应能力指

数-0.500,洪家镇高于中连川乡,家庭资本尤其是金融资本成为洪家镇高于中连川乡的核心因素。

在农户干旱脆弱性差异性方面(表3),就暴露而言,方差检验和*t*检验*Sig.*值分别为0.044和0.000,小于0.05,方差差异与均值差异显著;就敏感性而言,方差检验和*t*检验*Sig.*值均为0.000小于0.05,方差差异与均值差异显著;就适应能力而言,方差检验*Sig.*值为0.121,大于0.05,不存在方差差异,*t*检验*Sig.*值为0.000,小于0.05,均值差异显著;就脆弱性而言,方差检验和*t*检验*Sig.*值均为0.000,方差差异与均值差异显著。

3.2 农户干旱脆弱性类型

为揭示农户遭受干旱暴露产生的敏感性与适应能力的变化,以Perch-Nielse(2010)提出的暴露—敏感性&适应能力坐标系为依据,以暴露算数平均值作为横坐标,以敏感性&适应能力算数平均值为纵坐标,建立暴露—敏感性&适应能力坐标系,如图4所示。21个调研村分布于三个象限,分别为低

表3 农户干旱脆弱性差异性分析结果

Tab.3 Results of difference analysis of rural household drought vulnerability

	方差方程的 Levene 检验		均值方程的 <i>t</i> 检验				
	<i>F</i>	<i>Sig.</i>	<i>t</i>	<i>df</i>	<i>Sig.</i>	均值差值	标准误差值
<i>E</i> 假设方差相等	4.63	0.04	72.04	19.00	0.00	1.07	0.00
假设方差不相等			61.83	8.00	0.00	1.07	0.00
<i>S</i> 假设方差相等	24.65	0.00	-8.25	19.00	0.00	-3.47	0.42
假设方差不相等			-7.10	8.08	0.00	-3.47	0.49
<i>AC</i> 假设方差相等	2.64	0.12	6.81	19.00	0.00	0.72	0.11
假设方差不相等			6.22	11.07	0.00	0.72	0.12
<i>V</i> 假设方差相等	20.48	0.00	-6.54	19.00	0.00	-3.12	0.48
假设方差不相等			-5.65	8.25	0.00	-3.12	0.55

注:*E*为暴露指数,*S*为敏感性指数,*AC*为适应能力指数,*V*为脆弱性指数。

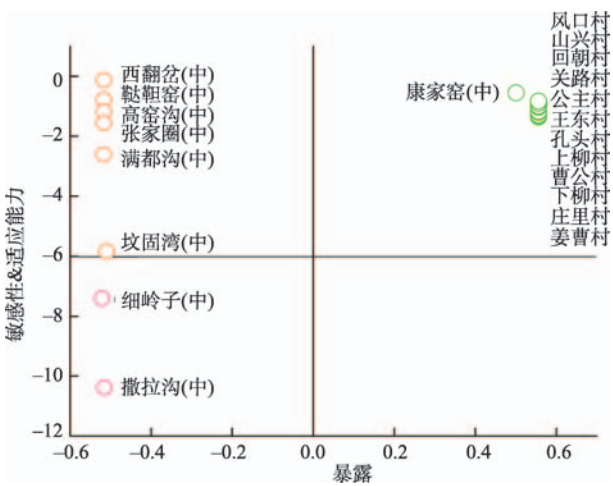


图4 不同村落农户干旱脆弱性类型

Fig.4 Types of rural household drought vulnerability in different villages

暴露—低敏感性&适应能力、低暴露—高敏感性&适应能力、高暴露—高敏感性&适应能力。属于低暴露—低敏感性&适应能力类型的村庄分别为细岭子村和撒拉沟村,该类型村庄典型特征为:当干旱暴露程度较低时,与其他村庄相比,其自身适应能力较低;属于低暴露—高敏感性&适应能力类型的村庄分别为西翻岔村、鞑鞑窑村、高密沟村、张家圈村、满都沟村、坟固湾村,该类型村庄典型特征为:当干旱暴露程度较低时,与其他村庄相比,其适应能力适中,因而干旱脆弱性适中;属于高暴露—高敏感性&适应能力类型的村庄分别为康家窑村、风口村、山兴村、关路村、回朝村、王东村、公主村、上柳村、庄里村、姜曹村、孔头村、下柳村、曹公村,该类型村庄典型特征为:当干旱暴露程度较高时,与其他村庄相比,其具有更高的适应能力,以致干旱

脆弱性低。就乡镇而言,中连川乡乡村属于低暴露—低敏感性&适应能力和低暴露—高敏感性&适应能力两种类型,呈现“低暴露—低(高)敏感性&适应能力—高(中)脆弱性”的特征,洪家镇乡村属于高暴露—高敏感性&适应能力类型,整体呈现“低暴露—高敏感性&适应能力—低脆弱性”的特征。

3.3 农户干旱适应能力及其适应机理

农户干旱恢复力是乡村人地系统在受到干旱扰动时能承受和维持系统仍处于稳定或预期状态的能力,蕴含在干旱条件变化情况下适应能力和对干旱的适应(Turner et al, 2003),作为恢复力的关键因素,适应能力决定着农户适应模式和适应效果的差异(喻忠磊等, 2013)。

3.3.1 农户干旱适应能力及差异性分析

洪家镇农户干旱适应能力指数平均值为0.218,中连川乡农户干旱适应能力指数平均值为-0.500,洪家镇农户干旱适应能力指数大于中连川乡。其中,洪家镇风口村适应能力指数为0.430,适应能力最高;中连川乡张家圈适应能力指数为-0.952,适应能力最低(表2)。就适应能力指标而言,如图5和表4所示,在住房类型方面,方差检验和 t 检验 Sig.值分别为0.071和0.300,大于0.05,不存在方差差异与均值差异,说明住房类型不存在差异;在最高学历方面,方差检验 Sig.值为0.106,大于0.05,不存在方差差异, t 检验 Sig.值为0.009,小于0.05,均值差异显著,说明最高学历存在均值差异。

在存款方面,方差检验 Sig.值为0.762,大于0.05,不存在方差差异, t 检验 Sig.值为0.000,小于0.05,均值差异显著,说明存款存在均值差异;在生计多样性方面,方差检验和 t 检验 Sig.值分别为

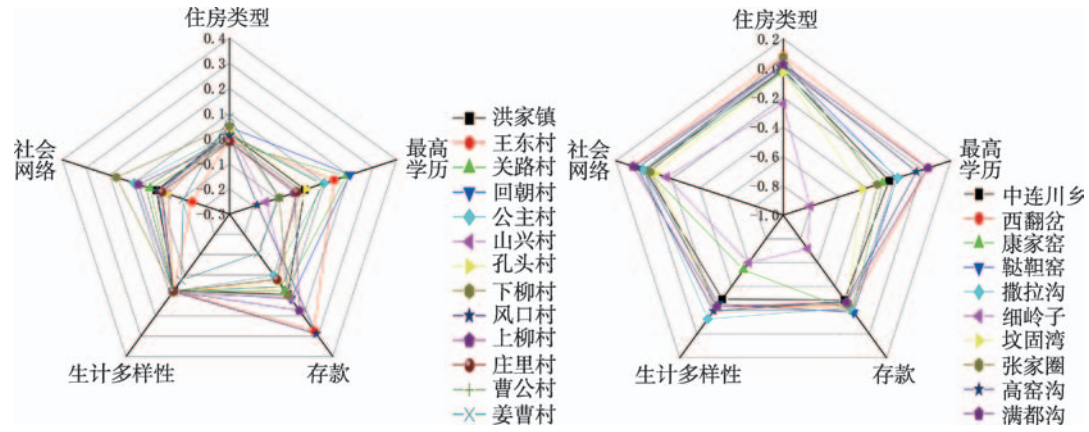


图5 适应能力雷达图

Fig.5 Radar diagram of adaptive capacity

表4 适应能力差异分析结果

Tab.4 Result of difference analysis of adaptive capacity

	方差方程的 Levene 检验		均值方程的 <i>t</i> 检验				
	<i>F</i>	<i>Sig.</i>	<i>t</i>	<i>df</i>	<i>Sig.</i>	均值差值	标准误差值
<i>B</i> 假设方差相等	3.651	0.071	1.065	19	0.300	0.313	0.029
假设方差不相等			0.939	9.155	0.372	0.313	0.033
<i>E</i> 假设方差相等	2.878	0.106	2.928	19	0.009	0.257	0.088
假设方差不相等			2.666	10.828	0.022	0.257	0.096
<i>S</i> 假设方差相等	0.095	0.762	6.372	19	0.000	0.383	0.060
假设方差不相等			6.030	13.358	0.000	0.383	0.064
<i>L</i> 假设方差相等	17.223	0.001	7.885	19	0.000	0.368	0.047
假设方差不相等			6.788	8.111	0.000	0.368	0.054
<i>SN</i> 假设方差相等	0.115	0.738	0.533	19	0.600	0.020	0.037
假设方差不相等			0.542	18.379	0.594	0.020	0.036

注:*B*为住房类型,*E*为最高学历,*S*为存款,*L*为生计多样性,*SN*为社会网络。

0.001和0.000,小于0.05,方差差异与均值差异显著,说明生计多样性存在方差和均值差异;在社会网络方面,方差检验和*t*检验*Sig.*值分别为0.738和0.600,大于0.05,方差差异和均值差异不显著,说明社会网络差异不显著。

3.3.2 农户干旱适应机理

干旱特征的差异(频率、强度和持续时间)直接影响暴露的程度。对于农户而言(图6),农业生态系统首当其冲受到直接影响,导致系统当前状态或预期状态受到扰动而发生改变。根据实地调研显示,干旱频率、强度和持续时间的增加,干旱加剧,并导致农作物种植结构和种植时间发生改变,农业投入、农业管理和农业活动相对减少,引致农业产量

和价格的波动,进而引起农户收入和生计系统(农户家庭生计和农业生计)的改变。面对这种改变,农户从中恢复的程度取决于适应能力即农户生计,五种资本的禀赋决定着农户应对扰动的内在能力,结合农业生计外部因素(如家庭主要农业劳动力从事农业时间及经验、农业设施、农业技术、农业投入和市场渠道的扩展等方面),减缓和消除干旱扰动的的影响。

然而,从事不同农业活动的农户在制定适应决策方面存在差异,具体差异体现在农户生计方式、土地利用、农作物种植结构与时间和地方政策扶持。根据实地调查发现,中连川乡以传统农业种植(玉米、土豆、胡麻、大豆、中药材)为主,生计来源主

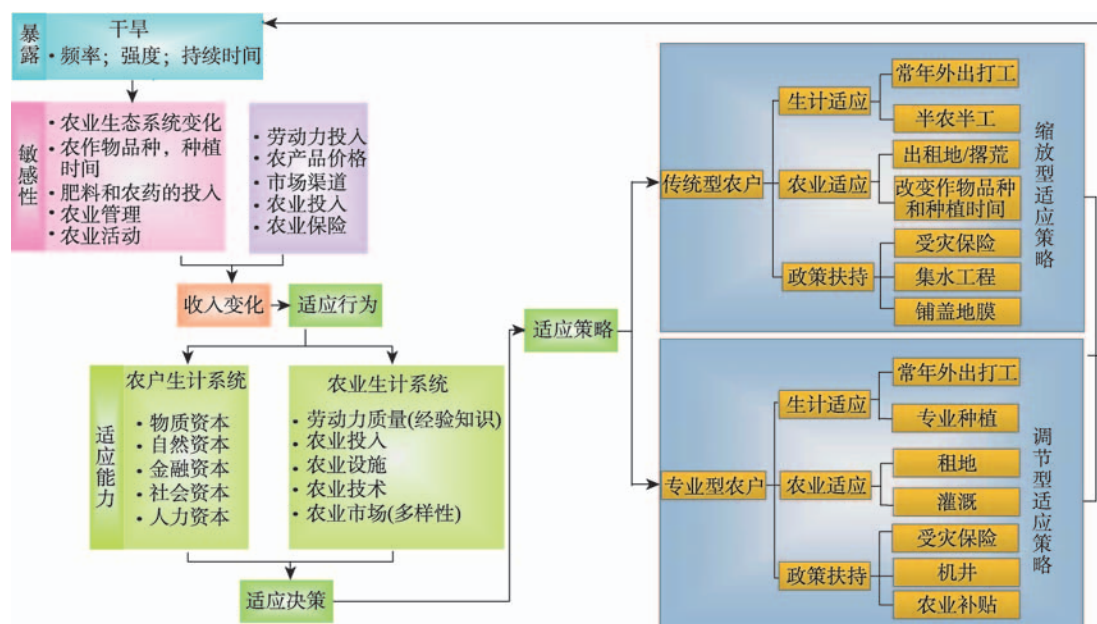


图6 农户干旱适应机理

Fig.6 Mechanism of rural household drought adaptation

要依靠青年劳动力外出打工和中年劳动力半工半农两种途径,在干旱年主要通过改变农作物种植时间和抗旱品种应对,对于家庭劳动力不足、耕地资源较多的农户,选择将耕地外包出租,偏远或山坡地选择撂荒;在政策扶持方面,地方政府对玉米和土豆执行受灾保险政策,同时设立集水工程和地膜补贴,并开设农业技术培训(学习能力)来提高农户缓解农业干旱的能力,然而由于年平均降水量较少,农户普遍通过自建水窖(自组织)的方式增加需水量,但也只能满足生活用水,形成了收缩型的适应模式。与中连川乡不同,洪家镇以大面积苹果种植为主,生计来源主要依靠青年劳动力外出打工和中年劳动力种植苹果两种途径,土地利用的转变主要发生在耕地少劳动力多和耕地较多劳动力多的家庭,以租入的方式将耕地多劳动力少的家庭荒地转换成自身自然资本,出租地的家庭以青年劳动力外出打工和中年在剩余耕地中种植苹果,在政策扶持方面,地方政府同样执行受灾保险政策,同时设立机井和农业补贴,并开展农业技术培训(学习能力)来提高缓解农业干扰的能力,由于洪家镇相比中连川乡年平均降水较多,正常年份年平均降水基本能满足生活和农业用水,而在干旱年份,农户通过自建机井或集资建机井(自组织)来满足农业用水,形成了调节型的适应模式。

因此,结合实地调研的实际情况,暴露—敏感性是影响农户收入的直接因素;农户生计系统(农户家庭生计系统和农业生计系统)是适应干旱暴露扰动的决定因子;农户类型、生计方式、土地利用、灌溉设施和政策扶持的差异性产生不同的适应模式和适应效果。

3.4 农户干旱脆弱性鲁棒性结果分析

如图7所示,通过排名出现的频率和变化范围构建排名频率—变化范围矩阵,排名出现的频率越高,网格颜色越深,排名变化范围越小,该排名的鲁棒性越强。就出现频率而言,排名对角线的网格颜色较深,说明整体该排名出现频率较高,排名出现频率达10次及10次以上的有风口村、满都沟、张家圈、坟固湾、细岭子、撒拉沟;就排名范围而言,排名范围平均值为6.810,排名范围变化较小,排名变化范围小于平均值的有关路村、王东村、公主村、姜曹村、孔头村、下柳村、鞑靼窑、高窑沟、满都沟、张家圈、坟固湾,其中公主村、鞑靼窑、张家圈、坟固湾排名变化范围最小,均为3。为更好地显示调研村农

户干旱脆弱性排名的集散情况,运用 Origin9.0 软件,描绘它们的排名箱形图。如图8所示,除西翻岔之外,其他调研村农户干旱脆弱性排名四分位距较小,同时趋于集中分布,进一步说明各调研村排名具有较强的稳健性。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 研究样本区农户干旱脆弱性指数变化幅度较大。其中,中连川乡农户干旱脆弱性指数大于洪家镇,且差异显著,原因为暴露指数、敏感性指数和适应能力指数均存在显著差异。(2) 通过暴露—敏感性&适应能力构建坐标系,将21个调研村分为低暴露—低敏感性&适应能力、低暴露—高敏感性&适应能力、高暴露—高敏感性&适应能力三种类型;处于三种类型村庄数量由高到低依次为:高暴露—高敏感性&适应能力>低暴露—高敏感性&适应能力>低暴露—低敏感性&适应能力。(3) 就适应能力指标而言,生计多样性、最高学历和存款存在显著差异,住房类型和社会网络不存在差异。(4) 农户干旱适应机理为暴露—敏感性是影响农户收入的直接因素;农户生计系统是适应干旱暴露扰动的决定因子;农户类型、生计方式、土地利用、灌溉设施和政策扶持的差异性产生不同的适应模式和适应效果。(5) 农户干旱脆弱性指数排名频率—变化范围矩阵对角线网格颜色较深,排名出现频率较高且排名变化范围较小,农户干旱脆弱性指数结果具有较强的鲁棒性。

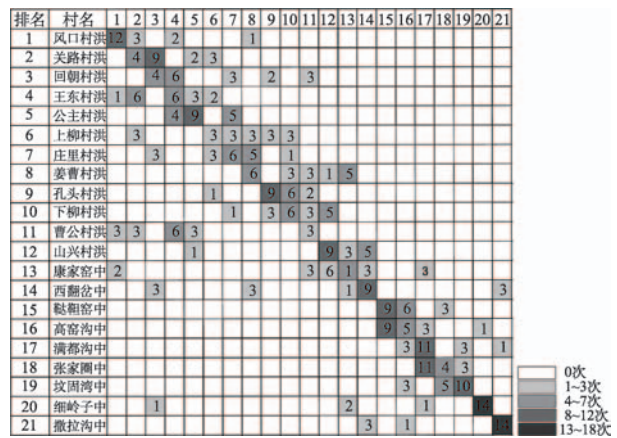


图7 不同村落农户干旱脆弱性指数鲁棒性分析结果
Fig.7 Result of robustness analysis of rural household drought vulnerability in different villages

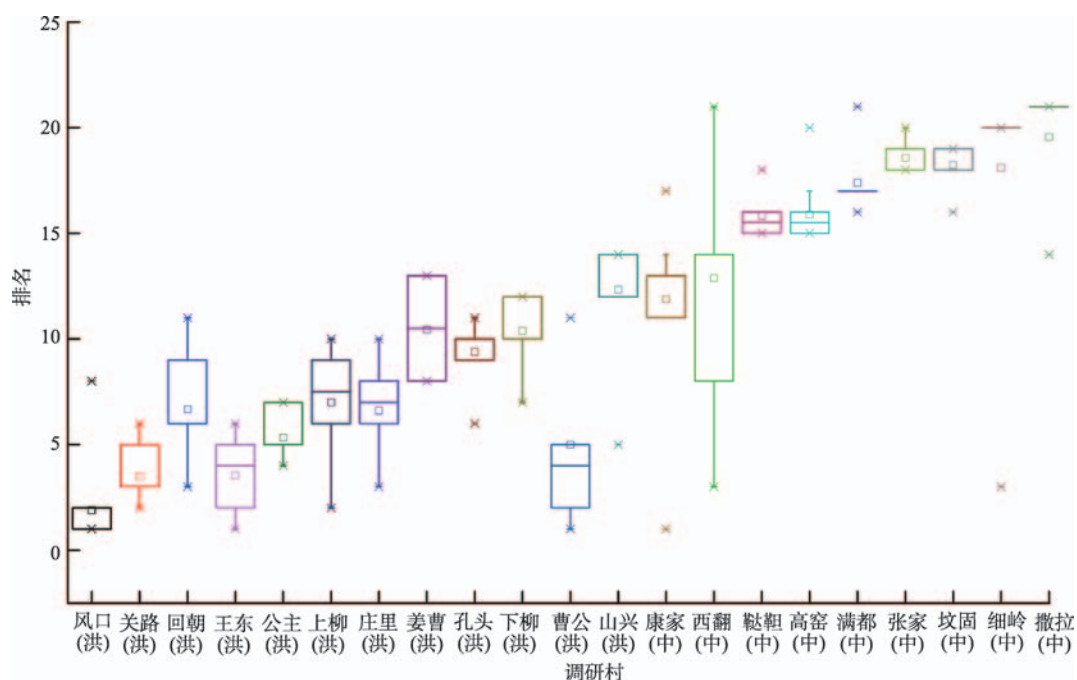


图8 不同村落农户干旱脆弱性排名频率—变化范围矩阵

Fig.8 Frequency-range matrix of rural household drought vulnerability ranking in different villages

4.2 讨论与展望

未来的农业与乡村地理学研究将越来越注重研究尺度的外扩与内敛。外扩主要表现在对一些宏观问题或巨型系统的探究,如乡村对全球变化导致的粮食安全、能源安全以及生物多样性变化等问题的响应,内敛则主要是指研究尺度的不断细化,如:乡村社区对环境不确定性的顺应能力(龙花楼等, 2014),这与脆弱性的相关研究相契合。从全球、国家尺度向地方尺度进行自上而下开展脆弱性研究被视为一个重要的挑战(Fang et al, 2016),农户干旱脆弱性的研究是一次探索式的尝试。

(1) 农户干旱脆弱性取决于生物物理环境系统(Bio-physical System)与人类系统的交互影响,更取决于暴露的程度、敏感性及农户的适应能力。乡村尺度干旱脆弱性对比分析可以揭示不同区位暴露在经历长时间的气候变化和自然灾害条件下对其脆弱程度的差异,对于不同地理区位的农户而言,农户脆弱的程度取决于适应能力(Ashraf et al, 2014),暴露越高,敏感性越高,适应能力越低意味着脆弱性越高,反之脆弱性越低。

作为脆弱性的重要组成要素之一,适应能力是与政策实施紧密相关的,提高适应能力可降低农户对干旱的敏感性。影响乡村适应能力的因素可以归结为以下两点:一是与机构管理有关,二是与自

身相关。在机构管理方面,机构对于地方、区域和国家在干旱环境下的农业重构至关重要,因为机构通过产权、税收、教育和信息影响资源的利用。此外,乡村的适应能力还与人口、人口依赖类型、经济地位相关(Lei et al, 2014)。除自身条件外,有效的适应策略对降低脆弱性至关重要。如通过改善灌溉设施,加强水资源管理降低农作物对干旱的敏感性;增加非农收入,丰富生计多样性,缩减经济支出以降低对自然资源生计的依赖性,进而减少对气候变化和极端天气的敏感性(王亚茹等, 2016)。

(2) 干旱脆弱性在全球变化领域和自然灾害领域取得突出进展。在全球变化领域,在农户尺度干旱程度(Severity)、强度(Intensity)和持续时间(Duration)对农户生计的影响(Li et al, 2013; Udmale et al, 2015; Khayyati et al, 2016; Merritt et al, 2016)。在自然灾害领域,运用恢复力思维构建灾害恢复力(Disaster Resilience),加强灾害风险管理(Hiete et al, 2012; Alshehri et al, 2015; Imperiale et al, 2016)。其中,Lei等(2014)采用“冲击-损害-恢复-学习”循环提出自然灾害风险管理框架,以解释自然灾害在人类—自然复杂系统的交互过程;在时间尺度上,将自然灾害划分为灾前(Pre-)、灾中(In-)、灾后(Post-)3个时间段,认为恢复力是系统能维持和在短时间内接受小规模救助或不接受救助的情况下从灾害损

失中恢复的能力,接受小规模救助或不接受借助有利于受灾农户主动应对干旱,降低农业干旱脆弱性,缩短干旱损失的恢复时间,维持乡村社会—生态系统的可持续性,从脆弱性和恢复力的视角为乡村人地系统脆弱性研究提供了新的视角。

(3) 脆弱性研究框架现仍存在不足之处,如权重的确定方法和结果的不确定性。脆弱性框架的权重赋值方法以等权重为主(de Grosbois et al, 2015; Ryu et al, 2016),另外还有比例法、AHP等方法(Liu et al, 2013; Aryal et al, 2014),但诸多学者认为以上权重赋值方法具有武断和主观性太强的弊端,因此具有统计学意义的赋值方法越来越受到关注和运用,如主成分分析和模糊层次分析法FAHP(Fuzzy Analytical Hierarchy Process, 简称FAHP)等(Bizimana et al, 2015; Şener et al, 2015)。此外,指标依赖性综合指数的结果受标准化方法、权重赋值方法和综合指数计算方法的影响,使得计算结果具有不确定性。脆弱性指数的不确定性已经受到关注,运用不确定评价(Uncertainty Assessment)、鲁棒性分析(Robustness Analysis)、不确定与敏感性分析(Uncertainty and Sensitivity Analysis)进行结果检验,增强综合指数的科学性和可信性(Brooks et al, 2005; Saisana et al, 2005; Tate, 2012; Harrison et al, 2015)。

参考文献(References)

鲍超, 方创琳. 2008. 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[J]. 地理科学进展, 27(3): 38-46. [Bao C, Fang C L. 2008. Impact of water resources exploitation and utilization on eco-environment in arid area: Progress and prospect[J]. Progress in Geography, 27(3): 38-46.]

程静, 陶建平. 2010. 全球气候变暖背景下农业干旱灾害与粮食安全: 基于西南五省面板数据的实证研究[J]. 经济地理, 30(9): 1524-1528. [Cheng J, Tao J P. 2010. Agricultural drought disaster and food security under the background of global warming: Based on panel data of five provinces of Southwest China[J]. Economic Geography, 30(9): 1524-1528.]

高超, 金凤君, 雷军, 等. 2012. 干旱区绿洲城市经济系统脆弱性评价研究[J]. 经济地理, 32(8): 43-49. [Gao C, Jin F J, Lei J, et al. 2012. Vulnerability assessment of economic system of oasis cities in arid area[J]. Economic Geography, 32(8): 43-49.]

郭永锐, 张捷. 2015. 社区恢复力研究进展及其地理学研究议题[J]. 地理科学进展, 34(1): 100-109. [Guo Y R, Zhang J. 2015. Research progress and themes of geography on

community resilience[J]. Progress in Geography, 34(1): 100-109.]

何斌, 武建军, 吕爱锋. 2010. 农业干旱风险研究进展[J]. 地理科学进展, 29(5): 557-564. [He B, Wu J J, Lv A F. 2010. New advances in agricultural drought risk study[J]. Progress in Geography, 29(5): 557-564.]

黄晓军, 黄馨, 崔彩兰, 等. 2014. 社会脆弱性概念、分析框架与评价方法[J]. 地理科学进展, 33(11): 1512-1525. [Huang X J, Huang X, Cui C L, et al. 2014. The concept, analytical framework and assessment method of social vulnerability[J]. Progress in Geography, 33(11): 1512-1525.]

蒋维, 王俊, 杨新军, 等. 2011. 黄土高原农村社会—生态系统体制转换初探: 以陕西省长武县洪家镇为例[J]. 人文地理, 26(1): 56-60. [Jiang W, Wang J, Yang X J, et al. 2011. A study of regime shift of rural social-ecological system in Loess Plateau: A case study of Hongjia Town of Changwu County, Shaanxi Province[J]. Human Geography, 26(1): 56-60.]

李芬, 于文金, 张建新, 等. 2011. 干旱灾害评估研究进展[J]. 地理科学进展, 30(7): 891-898. [Li F, Yu W J, Zhang J X, et al. 2011. Review of drought disaster evaluation[J]. Progress in Geography, 30(7): 891-898.]

刘卫东, 谭韧骝. 2009. 杭州城市蔓延评估体系及其治理对策[J]. 地理学报, 64(4): 417-425. [Liu W D, Tan R B. 2009. Evaluation system and control mechanism of urban sprawl: A case study of Hangzhou[J]. Acta Geographica Sinica, 64(4): 417-425.]

龙花楼, 刘彦随, 张小林, 等. 2014. 农业地理与乡村发展研究新近进展[J]. 地理学报, 69(8): 1145-1158. [Long H L, Liu Y S, Zhang X L, et al. 2014. Recent progress in agricultural geography and rural development research[J]. Acta Geographica Sinica, 69(8): 1145-1158.]

马琼, 张勃, 王东, 等. 2014. 1960-2012年甘肃黄土高原干旱时空变化特征分析: 基于标准化降水蒸散指数[J]. 资源科学, 36(9): 1834-1841. [Ma Q, Zhang B, Wang D, et al. 2014. The temporal and spatial distribution of drought on the Loess Plateau based on the standardized precipitation evapotranspiration index from 1960 to 2012[J]. Resources Science, 36(9): 1834-1841.]

邱海军, 曹明明, 郝俊卿, 等. 2013. 1950-2010年中国干旱灾情频率—规模关系分析[J]. 地理科学, 33(5): 576-580. [Qiu H J, Cao M M, Hao J Q, et al. 2013. Relationship between frequency and magnitude of drought damage in China in 1950-2010[J]. Scientia Geographica Sinica, 33(5): 576-580.]

王亚茹, 赵雪雁, 张钦, 等. 2016. 高寒生态脆弱区农户的气候变化适应策略: 以甘南高原为例[J]. 地理研究, 35(7): 1273-1287. [Wang Y R, Zhao X Y, Zhang Q, et al. 2016. Farmers' climate change adaptation strategies in an ecologically vulnerable alpine region: A case of Gannan Plateau

- [J]. *Geographical Research*, 35(7): 1273-1287.]
- 杨新军, 张慧, 王子侨. 2015. 基于情景分析的西北农村社会-生态系统脆弱性研究: 以榆中县中连川乡为例[J]. *地理科学*, 35(8): 952-959. [Yang X J, Zhang H, Wang Z Q. 2015. Vulnerability assessment of rural social-ecological system based on scenario analysis: A case study of Zhonglianchuan Town in Yuzhong County[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 35(8): 952-959.]
- 喻忠磊, 杨新军, 杨涛. 2013. 乡村农户适应旅游发展的模式及影响机制: 以秦岭金丝峡景区为例[J]. *地理学报*, 68(8): 1143-1156. [Yu Z L, Yang X J, Yang T. 2013. Exploring conditions, determinants and mechanisms of rural households' adaptability to tourism development: A case study of Jinsixia in Qinling Mountains[J]. *Acta Geographica Sinica*, 68(8): 1143-1156.]
- Alshehri S A, Rezgui Y, Li H J. 2015. Disaster community resilience assessment method: A consensus-based Delphi and AHP approach[J]. *Natural Hazards*, 78(1): 395-416.
- Aryal S, Cockfield G, Maraseni T N. 2014. Vulnerability of Himalayan transhumant communities to climate change[J]. *Climatic Change*, 125(2): 193-208.
- Ashraf M, Routray J K, Saeed M. 2014. Determinants of farmers' choice of coping and adaptation measures to the drought hazard in Northwest Balochistan, Pakistan[J]. *Natural Hazards*, 73(3): 1451-1473.
- Bizimana J P, Twarabamenye E, Kienberger S. 2015. Assessing the social vulnerability to malaria in Rwanda[J]. *Malaria Journal*, 14(1): 2.
- Brooks N, Adger W N, Kelly P M. 2005. The determinants of vulnerability and adaptive capacity at the national level and the implications for adaptation[J]. *Global Environmental Change*, 15(2): 151-163.
- de Grosbois D, Plummer R. 2015. Problematizing water vulnerability indices at a local level: A critical review and proposed solution[J]. *Water Resources Management*, 29(14): 5015-5035.
- Derbile E K. 2013. Reducing vulnerability of rain-fed agriculture to drought through indigenous knowledge systems in North-eastern Ghana[J]. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 5(1): 71-94.
- Eakin H, Bojórquez-Tapia L A. 2008. Insights into the composition of household vulnerability from multicriteria decision analysis[J]. *Global Environmental Change*, 18(1): 112-127.
- Fang Y P, Zhao C, Rasul G, et al. 2016. Rural household vulnerability and strategies for improvement: An empirical analysis based on time series[J]. *Habitat International*, 53: 254-264.
- Gbetibouo G A, Ringler C. 2009. Mapping South African farming sector vulnerability to climate change and variability: A subnational assessment[R]. IFPRI Discussion Papers 00885.
- Harrison P A, Holman I P, Berry P M. 2015. Assessing cross-sectoral climate change impacts, vulnerability and adaptation: An introduction to the CLIMSAVE project[J]. *Climatic Change*, 128(3-4): 153-167.
- Hiete M, Merz M, Comes T, et al. 2012. Trapezoidal fuzzy DEMATEL method to analyze and correct for relations between variables in a composite indicator for disaster resilience[J]. *OR Spectrum*, 34(4): 971-995.
- Hung L S, Wang C M, Yarnal B. 2016. Vulnerability of families and households to natural hazards: A case study of storm surge flooding in Sarasota County, Florida[J]. *Applied Geography*, 76: 184-197.
- Imperiale A J, Vanclay F. 2016. Experiencing local community resilience in action: Learning from post-disaster communities[J]. *Journal of Rural Studies*, 47: 204-219.
- Khayyati M, Aazami M. 2016. Drought impact assessment on rural livelihood systems in Iran[J]. *Ecological Indicators*, 69: 850-858.
- Kondyli J. 2010. Measurement and evaluation of sustainable development: A composite indicator for the islands of the North Aegean region, Greece[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 30(6): 347-356.
- Lei Y D, Wang J A, Yue Y J, et al. 2014. Rethinking the relationships of vulnerability, resilience, and adaptation from a disaster risk perspective[J]. *Natural Hazards*, 70(1): 609-627.
- Li Y, Conway D, Wu Y J, et al. 2013. Rural livelihoods and climate variability in Ningxia, Northwest China[J]. *Climatic Change*, 119(3-4): 891-904.
- Lindoso D P, Rocha J D, Debortoli N, et al. 2014. Integrated assessment of smallholder farming's vulnerability to drought in the Brazilian Semi-arid: A case study in Ceará [J]. *Climatic Change*, 127(1): 93-105.
- Liu X Q, Wang Y L, Peng J, et al. 2013. Assessing vulnerability to drought based on exposure, sensitivity and adaptive capacity: A case study in middle Inner Mongolia of China [J]. *Chinese Geographical Science*, 23(1): 13-25.
- Merritt W S, Patch B, Reddy V R, et al. 2016. Modelling livelihoods and household resilience to droughts using Bayesian networks[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 18(2): 315-346.
- Naumann G, Barbosa P, Garrote L, et al. 2013. Exploring drought vulnerability in Africa: An indicator based analysis to inform early warning systems[J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 10(10): 12217-12254.
- Perch-Nielsen S L. 2010. The vulnerability of beach tourism to climate change: An index approach[J]. *Climatic Change*, 100(3-4): 579-606.
- Piya L, Joshi N P, Maharjan K L. 2016. Vulnerability of

- Chepan households to climate change and extremes in the Mid-Hills of Nepal[J]. *Climatic Change*, 135(3-4): 521-537.
- Ryu J, Lee D K, Park C, et al. 2016. Assessment of the vulnerability of industrial parks to flood in South Korea[J]. *Natural Hazards*, 82(2): 811-825.
- Saisana M, Saltelli A, Tarantola S. 2005. Uncertainty and sensitivity analysis techniques as tools for the quality assessment of composite indicators[J]. *Journal of the Royal Statistical Society: Statistics in Society*, 168(2): 307-323.
- Şener E, Şener Ş. 2015. Evaluation of groundwater vulnerability to pollution using fuzzy analytic hierarchy process method[J]. *Environmental Earth Sciences*, 73(12): 8405-8424.
- Singh R K, Murty H R, Gupta S K, et al. 2012. An overview of sustainability assessment methodologies[J]. *Ecological Indicators*, 15(1): 281-299.
- Tánago I G, Urquijo J, Blauhut V, et al. 2016. Learning from experience: A systematic review of assessments of vulnerability to drought[J]. *Natural Hazards*, 80(2): 951-973.
- Tate E. 2012. Social vulnerability indices: A comparative assessment using uncertainty and sensitivity analysis[J]. *Natural Hazards*, 63(2): 325-347.
- Thomas T, Jaiswal R K, Galkate R, et al. 2016. Drought indicators-based integrated assessment of drought vulnerability: A case study of Bundelkhand droughts in central India[J]. *Natural Hazards*, 81(3): 1627-1652.
- Turner II B L, Kasperson R E, Matson P A, et al. 2003. A framework for vulnerability analysis in sustainability science[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(14): 8074-8079.
- Udmale P D, Ichikawa Y, Manandhar S, et al. 2015. How did the 2012 drought affect rural livelihoods in vulnerable areas? Empirical evidence from India[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 13: 454-469.
- Wittrock V, Kulshreshtha S N, Wheaton E. 2011. Canadian prairie rural communities: Their vulnerabilities and adaptive capacities to drought[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 16(3): 267-290.
- Wu D, Yan D H, Yang G Y, et al. 2013. Assessment on agricultural drought vulnerability in the Yellow River basin based on a fuzzy clustering iterative model[J]. *Natural Hazards*, 67(2): 919-936.

Rural household vulnerability to drought and adaptation mechanism on the Loess Plateau

SHI Yuzhong, WANG Jun, WANG Ziqiao, LU Daming, YANG Xinjun*

(College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: Analyzing vulnerability and adaptation to drought is an important part of the study on human-environment relationship in arid and semiarid regions. It has also become the new viewpoint of human-environment system sustainability research in the rural areas of northwestern China. This research adopted the framework of vulnerability analysis proposed by Turner and adapted it for analyzing rural household vulnerability and adaptation to drought on the Loess Plateau. It integrated and analyzed meteorological data and questionnaire survey to examine household drought vulnerability and difference and inspected the uncertainty of the results applying Principal Component Analysis, Difference Analysis, and Robustness Analysis methods. This study also revealed the mechanism of adaptation to drought with regard to adaptive capacity, adaptation strategies, and adaptation mode. The main results include: (1) there exist significant differences between the villages in drought vulnerability index values—the vulnerability value of Zhonglianchuan is higher than that of Hongjia; (2) with regard to adaptation mechanism, exposure-sensitivity influences farmer income, farmer livelihood system determinates adaptive capacity, and differences in the type of household, livelihood strategy, land use, irrigation facilities, and policy support generate different adaptation modes and consequence; (3) the high frequency and narrow range of household drought vulnerability index indicates relatively high robustness of the result.

Key words: rural household drought vulnerability; adaptation mechanism; robustness analysis; Loess Plateau