大型喷灌条件下马铃薯田间土壤含水率空间变异特征及合理采样数研究

李 涛，张建丰，熊思源，张瑞晞
（西安理工大学 水利水电学院，陕西 西安 710048）

摘 要：[目的] 研究马铃薯田间不同深度土壤含水率的空间分布规律及其合理采样数，为大型喷灌条件下精准灌溉制度的制定提供科学依据。[方法] 在约 34 hm^2 的农田中采用固定与随机相结合的方法布设了 116 个取样点，分别测定了 0—20 cm 和 20—40 cm 深度的土壤含水率，采用经典统计学与地统计学相结合的方法，研究喷灌前后马铃薯生长期内土壤含水率的空间分布特征及其合理采样数。[结果] 0—20 cm 深度灌溉前和灌溉后的平均土壤含水率的变化范围 7.61%～13.79%，20—40 cm 深度灌溉前和灌溉后的平均土壤含水率的变化范围为 8.71%～16.12%；总体上土壤含水率变异系数变化范围为 16.47%～28.55%，均表现为中等程度的变异性，20—40 cm 深度的土壤含水率变异程度略高于表层。连续 2 a 马铃薯各时期土壤含水率总体表现为中等程度的空间相关性，土壤含水率空间变异受随机因素与结构因素共同影响。田间水分总体上呈斑块状分布，灌水后期土壤含水率的分布较灌前更为分散。地统计学得出田间合理采样数为 87 个。[结论] 在大型喷灌条件下马铃薯田间土壤含水量存在中等程度的空间变异性，并且地统计学与传统统计学两种方法均适用于确定农田平均土壤含水率的最优采样数量。

关键词：土壤含水率；空间变异；马铃薯；地统计学；合理采样数
文献标识码：B **文章编号**：1000-288X(2020)02-0222-10 **中图分类号**：S274.3

文献参数：李涛，张建丰，熊思源，等.大型喷灌条件下马铃薯田间土壤含水率空间变异特征及合理采样数研究[J].水土保持通报，2020，40(2)：222-231. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2020.02.033；Li Tao，Zhang Jianfeng，Xiong Siyuan，et al. Spatial variation of soil moisture content and reasonable sampling number in potato field under condition of sprinkler irrigation [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2020，40(2)：222-231.

Spatial Variation of Soil Moisture Content and Reasonable Sampling Number in Potato Field Under Condition of Sprinkler Irrigation

Li Tao，Zhang Jianfeng，Xiong Siyuan，Zhang Ruixi
(*College of Water Resource and Hydropower，Xi'an University of Technology，Xi'an，Shaanxi* 710048，*China*)

Abstract：[Objective] The spatial distribution and reasonable sampling of soil moisture content in potato field were studied，in order to provide scientific proof for precision irrigation system under the condition of large sprinkler irrigation. [Methods] A total of 116 sample points was selected in a 34 hm^2 farmland by the combination of fixed and random sampling. The soil moisture content of 0—20 cm and 20—40 cm depth was measured respectively. The traditional statistics combined with geostatistics were used to analyze the characteristic of the spatial distribution of soil moisture content and the reasonable sampling number. [Results] The soil water content at 0—20 cm depth before and after irrigation ranged from 7.61% to 13.79%，the soil water content at 20—40 cm depth before and after irrigation was ranged from 8.71% to16.12%. The overall variation coefficient of soil moisture content was 16.47%～28.55%，showing a moderate variability，and the variation of soil water content at 20—40 cm depth was slightly higher than that of the surface layer. The soil

收稿日期：2019-10-25 **修回日期**：2019-11-04
资助项目：国家自然科学基金项目“喷灌水肥分布对马铃薯产量和品质空间变异的影响”(51609197)；陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(16Js084)
第一作者：李涛(1984—)，男(汉族)，陕西省延安市人，博士，讲师，主要从事为节水灌溉理论与新技术方面的研究。Email：litao4891@163.com。
通讯作者：张建丰(1962—)，男(汉族)，陕西省西安市人，教授，博士生导师，主要从事土壤物理，节水灌溉理论与新技术方面的研究。Email：jfzhang@mail.xaut.edu.cn。

moisture content of potato at different times in successive two years showed a moderate spatial correlation, and the spatial variation of soil moisture content was influenced by random factors and structural factors. The distribution of soil moisture in the field was patchy, and soil mositure in the late irrigation period was more disordered than that before irrigation. According to geostatistics, the number of reasonable sampling in the field was 87. [Conclusion] Under the condition of large-scale sprinkler irrigation, the soil moisture content of potato field shows a moderate variability, and both geostatistics and traditional statistics methods are suitable for determining the optimal sampling number of soil moisture content in the potato field.

Keywords: soil moisture content; spatial variation; potato; geostatistics; reasonable sample number

西北地区水资源稀缺,灌溉水有效利用率低。该地区土质疏松,日照时数长,昼夜温差大,有利于植物光合产物的积累,适于马铃薯的种植。由于自然条件下,田间土壤质地一般具有空间变异性,同时由于灌溉水分在空间分布上也不完全均匀,导致了土壤含水率的时空变异性[1]。本文对比研究了马铃薯主要生育期内灌溉前后干旱沙漠地区田间土壤水分的空间变异性及动态变化,了解该土壤水分空间运动和分布,对改善田间管理,缓解该区域水资源紧张、农业水利技术的应用有着重要意义[2-5]。在水文与土壤学领域中,关于土壤含水率的时空变异已做了许多研究。Famiglietti 等[6]探讨了山坡表层土壤含水率的空间变异性及其影响因素,并认为 Austin 坡面土壤含水率的变异性主要受到地形和土壤属性的联合影响。蒋超等[7]研究了在沙垄不同位置的土壤含水率的空间变异性,结果表明土壤水分的结构性变异占总变异的大部分。Andrew 等[8]通过田间试验发现,土壤含水率的空间变异性与平均土壤含水率呈正相关。而 Fitzjohn 等[9]研究了径流和侵蚀条件下流域内土壤含水率的时空变异性,发现土壤含水率的空间变异程度会随着平均土壤含水量升高而降低。Petrone 等[10]发现土壤含水率的空间结构在干和湿的情况下不同。王改改[11]等研究了四川盆地丘陵区土壤含水率的空间变异性,土壤含水率的垂向变异系数随深度的增加而减小。Minha Choi[12]等采用遥感技术研究作物根区土壤含水率的变化情况,结果表明表层土壤水分在较低的情况下是对数正态分布,在较高的情况下是正态分布,而根系层土壤含水率均为正态分布。Brocca[13]等研究了一个小流域土壤含水率的时空变异特性,土壤含水率空间分布的离散性随平均土壤含水率的增加而降低。农田中土壤含水率的空间变异性越大,为了较准确获得一个区域内某一土壤属性的平均值所需的采样点数越多。目前不同尺度土壤属性的合理采样数的研究是国内外热点问题。Liao 等[14]对太湖流域一个山坡的土壤含水率空间变异特性进行了分析,并采用平均聚类分析法得到 40 个随机取样点可以得到这个区域的较准确的平均含水率。Wang 等[15]发现山西平朔地区一个 0.44 km^2 露天煤矿的 0—80 cm 深度的土壤中有机质含量的合理采样数量约为 40 个取样点。齐雁冰等[16]发现县域尺度土壤有机质合理采样数最少为 2 213 个,一个采样单元的面积最大为 17.8 hm^2。谢宝妮等[17]采用 Cochran 法研究得出在置信水平为 95%、相对误差为 5%的条件下,白水县内土壤中有效磷、碱解氮和速效钾所需合理样本数分别为 526,279 和 256 个。综上所述,此前学者对自然条件下流域尺度土壤含水率变异特性及合理取样数都进行了大量的研究,但近些年对大型喷灌条件下马铃薯田间土壤水分空间变异特性及合理取样数影响的研究较少。鉴于此,本文采用经典统计学和地统计学相结合的方法,以大型喷灌条件下马铃薯农田土壤含水率为研究对象,主要探究内容包括:①喷灌前后土壤含水率的空间变异特性及空间分布特征;②喷灌前后获得田间平均土壤含水率的合理采样点数;研究结果将为大型喷灌条件下精准灌溉制度的制定提供科学的参考依据,为该地区提高马铃薯灌溉水分利用效率及节约水资源的具有重要意义。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

马铃薯种植基地位于陕西省榆林市榆阳区管辖范围(38°09′06.11″N,109°00′23.73″E,海拔高度1 183 m),属于黄土高原丘陵沟壑过渡地带,干旱半干旱风沙性气候。年均温 6.0～8.5 ℃,年降水量 250～440 mm,集中于 7—9 月,占全年降水 60%～75%。降水年际变率大,多雨年为少雨年 2～4 倍,常发生旱灾和涝灾,且旱多于涝。该基地的土壤是沙丘平整后覆盖 8 cm 壤土的沙壤土,与下层沙土充分混合,种植面积 28.26 hm^2。试验地 2016 年马铃薯品种为荷兰薯,5 月上旬种植,8 月底杀秧收获,生长期 115 d。2017 年马铃薯品种为夏波蒂,4 月下旬种植,9 月中旬杀秧收获,生长期 155 d。马铃薯垄向为南北走向,播种密度为 49 500 株/hm^2,株距 20 cm,行距 80 cm。灌溉采用大型指针式喷灌机,喷灌半径 300 m,灌水定额为 11 mm,灌水周期平均约 3 d,2016 年灌溉定额为 429 mm,2017

年灌溉定额为 473 mm，田间的土壤颗粒组成详见表 1。2016 年和 2017 年马铃薯生育期内的累积降雨量分别为 631.88 和 528.55 mm，2 a 均属于丰水年，降雨量在生育期内具体分布如图 1 所示。

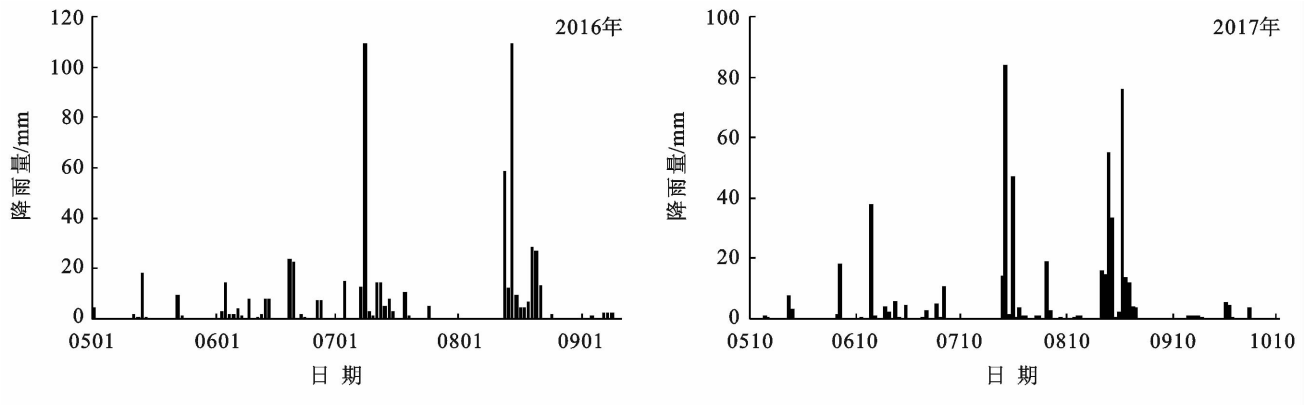


图 1 研究区 2016—2017 年马铃薯生长期内降雨量

1.2 试验设计与数据采集

根据地统计学原理并参考相关文献中取样点的布置方式[2-5,8-11]，试验中，以喷灌机基座为圆点，在夹角 45°的 8 条半径上以间隔 25 m 的距离均匀的布置 96 个固定采样点和 20 个随机采样点，共计 116 个采样点，如图 2 所示。利用 TDR 水分传感器（大连祺峰，SMS-Ⅱ-100）测定各月份 116 个采样点灌溉前后 0—20 cm，20—40 cm 土壤体积含水率，并用烘干法测定质量含水率对其进行校正；研究区域土壤类型为沙壤土，试验初期对采样点 0—20 cm，20—40 cm 土样进行取样，经风干、过 2 mm 筛后采用 Mastersizer 2000 型激光粒度仪测定样品颗粒组成（表 1）。

表 1 马铃薯田间各土层土壤粒径组成 %

粒径/mm	<0.005	≥0.005～<0.02	≥0.02～<0.1	≥0.1～<0.5	≥0.5～<2.0
0—20 cm	0.12	2.77	8.00	11.86	77.26
20—40 cm	0.12	2.99	8.86	14.42	73.61

1.3 数据分析方法

1.3.1 *地统计分析* 地统计分析是基于区域化理论基础的一种空间变量变异性分析方法，本文采用半方差函数分析喷灌条件下采样空间内的土壤含水率的空间依赖性，半方差函数为：

$$\gamma(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}[Z(x_i)-Z(x_i+h)]^2 \quad (1)$$

式中：$\gamma(h)$表示采样空间内相距为 h 两点间的平均方差；$N(h)$表示在采样空间上具有相同间隔距离 h 的点对数量；$Z(x_i)$，$Z(x_i+h)$表示土壤含水率在空间位置 x_i 与 x_i+h 上的测量值。

1.3.2 *经典统计学确定合理采样数* 传统统计学一般用 Cochran 提出的针对随机取样而构建的最佳取样数量，计算公式为：

$$N=\left(\frac{t\cdot C_v}{d}\right)^2 \quad (2)$$

式中：N 为需要的采样数；C_v 为土壤含水率的变异系数；t 为各显著性水平对应的 t 氏分布值；d 为估算精度。

1.3.3 *克里格插值确定合理采样数* 采用均方根误差（RMSE）和相关系数（R）对插值精度进行评价，计算公式为：

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{1/n\sum_{i=1}^{n}[Y(X_i)-Y^*(X_i)]^2} \quad (3)$$

$$R=\frac{\mathrm{Cor}(Y,Y^*)}{\sqrt{\mathrm{var}[Y]\,\mathrm{var}[Y^*]}} \quad (4)$$

式中：$Y(X_i)$，$Y^*(X_i)$为土壤含水率的实测值和预测值，RMSE 值越小，预测值越接近实测值；$\mathrm{Cor}(Y,Y^*)$为实测值和预测值的协方差；$\mathrm{var}[Y]$，$\mathrm{var}[Y^*]$为实测值和预测值的方差，相关系数 R 越大，预测误差就越小，精度就越高。试验随机选取 29，42，58，87，116 个采样点进行克里格插值，分析不同采样数下的土壤含水率的预测精度，确定喷灌条件下土豆地土壤含水率的合理采样数目。

2 结果与讨论

2.1 土壤含水率常规统计分析

表 2 显示了不同时期 0—20 cm 与 20—40 cm 土壤体积含水率的统计特征值。由表 2 可知，2016 年土壤平均含水率变化范围分别为 8.28%～16.12%，变异系数 C_v 变化范围为 20.55%～28.31%。2017

年土壤平均含水率最小值为 7.61%,出现在 8 月 21 日灌溉前 0—20 cm 土层,最大值 14.65%出现在 9 月 12 日灌溉后 20—40 cm 土层,变异系数变化范围为 16.47%～28.55%。两年中土壤含水率变异系数较为一致,均表现为中等程度的变异性,这表明马铃薯各生育阶段灌水前后田间水分的空间分布均表现为中等程度的不均匀性,这与戚春华[18]在毛乌素沙漠喷灌种植紫花苜蓿的研究结果相一致。对比两土壤层次土壤含水率的变异性大小,可知 20—40 cm 土层深度的变异性略高于 0—20 cm 的土层。由于研究区处于沙漠地区,日蒸发量较大。在 20—40 cm 土层马铃薯根系密度最大,存在较多的水分横向移动,使得 20—40 cm 土层变异系数略大,这与赵文举[19]等研究结果相似。对比灌水前后,灌溉后土壤含水率变异系数均小于灌水前,主要原因是喷灌机的喷灌均匀度经实测两年分别为达到了 79%与 81%,喷灌水分在空间分布比较均匀一定程度的中和了田间土壤含水率的变异性,灌溉后由于田间的结构因素及随机因素使得田间土壤含水率的差异越来越大。这与李宝富、李芳松等的研究结果相一致[20-21]。

表 2　研究区 2016 与 2017 年土壤含水率描述性统计结果

项 目	土壤深度/cm	采样日期	平均值/%	最小值/%	最大值/%	峰度	偏度	变异系数/%
2016 年土壤含水率	0—20	0713(灌前)	8.51	4.74	13.79	0.24	0.75	24.59
		0715(灌后)	13.27	7.12	21.24	−0.05	0.44	23.96
		0731(灌前)	9.43	5.79	14.84	0.04	0.54	25.74
		0801(灌后)	13.79	8.13	21.6	0.57	0.54	21.92
		0815(灌前)	8.28	4.11	14.10	0.21	0.72	27.77
		0817(灌后)	11.74	6.63	18.10	−0.03	0.51	23.56
	20—40	0713(灌前)	9.17	5.51	14.80	−0.51	0.52	24.61
		0715(灌后)	14.39	7.29	24.35	0.57	0.83	23.40
		0731(灌前)	11.29	5.85	18.12	0.01	0.49	24.12
		0801(灌后)	16.12	8.22	26.20	0.13	0.62	22.91
		0815(灌前)	9.08	4.96	15.59	−0.46	0.58	28.58
		0817(灌后)	13.07	6.18	21.59	−0.27	0.30	26.04
2017 年土壤含水率	0—20	0515	10.18	7.04	14.14	−0.03	0.49	16.47
		0623(灌前)	9.22	6.18	13.78	0.03	0.76	18.90
		0624(灌后)	11.47	7.92	18.18	1.01	0.93	17.26
		0723(灌前)	8.85	6.18	20.78	1.87	0.36	21.77
		0724(灌后)	11.72	7.99	18.33	1.38	0.68	16.84
		0821(灌前)	7.61	4.83	10.56	1.25	0.79	19.11
		0822(灌后)	10.5	7.54	19.81	1.60	0.64	17.05
		0911(灌前)	7.87	3.75	9.88	0.76	0.67	24.18
		0912(灌后)	11.28	7.56	16.04	−0.59	0.45	20.18
	20—40	0515	11.45	7.68	21.00	1.63	0.82	22.15
		0623(灌前)	10.39	6.47	14.48	−0.98	0.26	24.15
		0624(灌后)	14.11	7.84	28.50	1.14	0.86	19.38
		0723(灌前)	9.95	6.80	21.24	1.83	0.62	24.24
		0724(灌后)	13.3	7.26	26.39	1.07	0.77	24.86
		0821(灌前)	8.72	5.15	14.68	0.33	0.66	19.15
		0822(灌后)	12.30	7.91	12.30	1.08	0.53	20.60
		0911(灌前)	8.71	3.95	14.4	1.27	0.47	28.55
		0912(灌后)	14.65	9.01	26.25	1.19	0.45	25.99

图 2 为 2016 年,2017 年土壤平均含水率与变异系数关系的散点图及其拟合曲线。从图 2 可以看出,两年拟合的结果相似,平均土壤含水率越大其对应的变异系数越小,土壤含水率变异系数随着土壤含水率增加而减少,这与 Fitzjohn 等[9]的研究结果相一致。反映出了土壤平均含水率对土壤水分变异程度的关系。2016 年与 2017 年都呈现出指数函数的关系:

$$C_v = ae^{b\varphi} \tag{5}$$

式中:φ 为平均土壤含水率;a,b 为拟合参数(表 3),拟合参数 a 和 b 的数量级及其公式与此前的一些研

究结果相一致。两年的拟合参数 a 和 b 大小趋近，决定系数 R^2 分别为 0.48，0.43拟合较好。

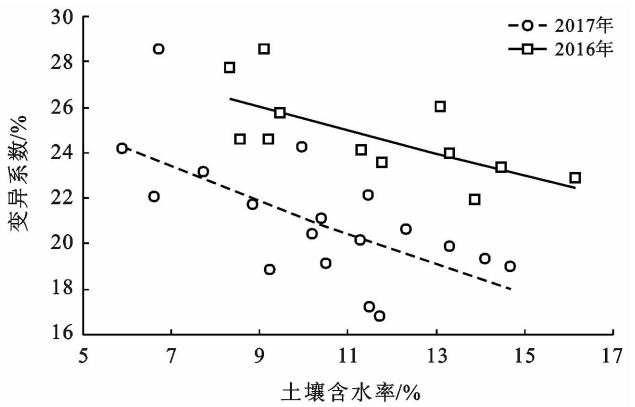


图 2 土壤平均含水率与变异系数关系的散点图及其拟合曲线

表 3 研究区土壤含水率与其 C_v 的指数拟合参数

年份	拟合点数量	a	b	R^2
2016	12	31.30	−0.021	0.48
2017	18	29.51	−0.033	0.43

2.2 土壤含水率时空变异特征分析

2.2.1 变异函数分析 为反映土壤含水率的空间结构性及随机性，应用 ArcGIS 10.3 软件地统计学模块，在不考虑各向异性的情况下，分别对各个时期各土层土壤含水率数据进行标准化处理后进行半方差分析。通过决定系数(R^2)选择最优半方差函数模型对其进行拟合，各时期最优拟合模型以球状模型居多。因此，为了便于比较分析研究结构，统一采用球状模型进行拟合，得到表 4 研究区土壤含水率地统计学参数。

表 4 研究区 2016 和 2017 年土壤含水率的地统计学参数

项 目	土壤深度/cm	日期	块金值	基台值	块基比	变程/m	R^2
2016 年土壤含水率	0—20	0713(灌前)	0.61	0.97	0.63	89.58	0.73
		0715(灌后)	0.52	0.9	0.58	182.97	0.86
		0731(灌前)	0.72	1.1	0.65	89.04	0.88
		0801(灌后)	0.74	1.16	0.64	123.09	0.81
		0815(灌前)	0.57	0.94	0.61	92.2	0.77
		0817(灌后)	0.57	1.06	0.54	88.03	0.82
	20—40	0713(灌前)	0.94	1.49	0.63	83.49	0.85
		0715(灌后)	0.65	0.97	0.67	152.56	0.89
		0731(灌前)	0.63	0.91	0.69	80.26	0.74
		0801(灌后)	0.67	1.22	0.55	98.8	0.89
		0815(灌前)	0.94	1.44	0.65	90.65	0.87
		0817(灌后)	0.59	1.1	0.54	88.72	0.81
2017 年土壤含水率	0—20	0515	0.6	1.26	0.48	90.21	0.85
		0623(灌前)	0.7	1.13	0.62	87.54	0.71
		0624(灌后)	0.67	0.97	0.69	122.76	0.76
		0723(灌前)	0.79	1.21	0.65	90.87	0.84
		0724(灌后)	0.62	1.02	0.61	87.76	0.78
		0821(灌前)	0.91	1.38	0.66	112.76	0.81
		0822(灌后)	0.45	0.95	0.47	137.55	0.81
		0911(灌前)	0.66	1.15	0.57	96.54	0.76
		0912(灌后)	0.42	1.02	0.41	165.45	0.88
	20—40	0515	0.81	1.44	0.56	101.73	0.87
		0623(灌前)	0.95	1.48	0.64	96.02	0.84
		0624(灌后)	0.52	0.93	0.56	123.61	0.83
		0723(灌前)	0.81	1.14	0.71	99.52	0.78
		0724(灌后)	0.69	1.11	0.62	91.03	0.80
		0821(灌前)	0.76	1.38	0.55	121.48	0.74
		0822(灌后)	0.65	1.22	0.53	136.09	0.85
		0911(灌前)	0.77	1.27	0.61	97.58	0.91
		0912(灌后)	0.77	1.38	0.56	156.34	0.83

从表 4 可以看出，连续两年灌水周期内不同时期 0—20 cm 土壤含水率块金值变化范围为 0.42～0.91，20—40 cm 土层为 0.52～0.95。总体上，土壤含水率的块金值表现为土壤上层(0—20 cm)小于下层，原因

与常规统计分析土壤含水率一致,在 20—40 cm 土层深度存在的根系较多,水分分布受根系吸水活动影响较大。块基比是块金值与基台值的比值,反映了土壤含水率的空间变异程度,当块基比小于 25%时,表明空间变异性较小,当块基比大于 25%且小于 75%时,表明空间变异程度中等,当块基比大于 75%时,表明空间变异性程度较强。当空间变异性达到中等及以下时,说明结构性变异是引起空间变异的主要因素,而不是随机性因素引起的。0—20 cm 和 20—40 cm 土壤含水率的块基比差别不大,总体上块基比范围在0.41到 0.71 之间,平均值为 0.60,呈现中等程度的变异性,说明 40 cm 以上土壤含水率的变异性相似,随机性的变异大约占到 60%,结构性的变异占 40%。此外,总体上在 0—40 cm 土层中,土壤含水率的块基比在灌溉前略小于灌溉后,表明喷灌略微减小了土壤含水率的随机性变异,增加了结构性变异,进一步说明土壤含水量的增加,其空间相关性会随平均土壤含水率的增加而增大,这与李宝富等在新疆干旱区研究灌溉前后土壤含水量的结果类似[2]。两年间土壤含水率灌溉前变程在 80.26～121.48 m 之间,灌溉后变程范围为 87.76～182.97 m 之间,变化范围较大,这说明喷灌增大了土壤含水率的空间自相关距离。对比连续两年马铃薯三个主要生育期块茎膨大期(2016 年 7 月 13—15 日、2017 年 6 月 23—24 日)、淀粉积累期(2016 年 7 月 31 至 8 月 1 日、2017 年 7 月 23—24 日)和成熟期(2016 年 8 月 15—17 日、2017 年 8 月 21—22 日),其成熟期的块基比大体上小于淀粉积累期和块茎膨大期,其原因可能是马铃薯消耗水量相对于块茎形成期和块茎膨大期是相对较小,土壤中水分横向移动较小,受随机因素影响较小,其空间相关性增强。

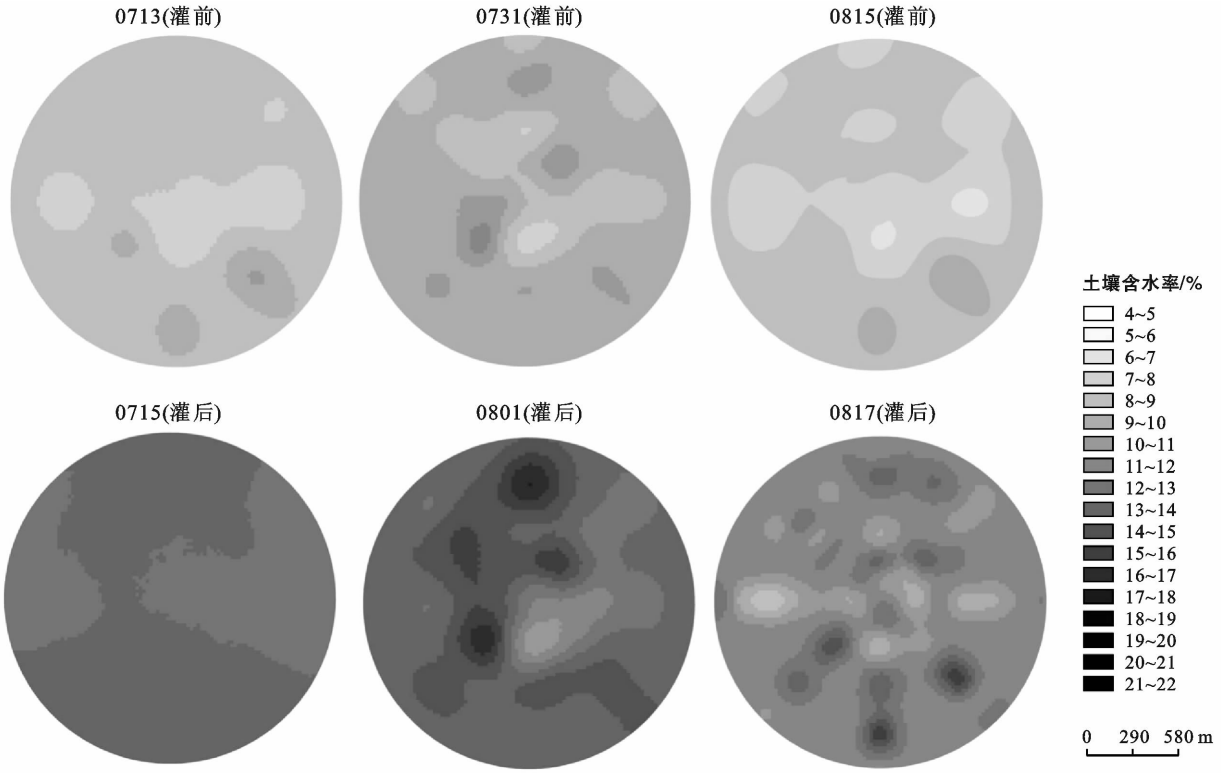
2.2.2　*土壤含水率的空间分布特征*　为了能更直观地反映土壤水分空间分布,用 ArcGIS 10.3 软件运用普通 Kinging 法进行插值并绘制土壤含水率空间分布图(以 2016 年为例)如图 3 所示。从图 3 可以看出,灌溉前土壤含水率高值区位于南部,低值区位于东部,这表明在喷灌区的南部灌水定额可以适当降低,在喷灌区东部灌溉定额可以适当增加。灌溉后高值中心与低值中心空间分布与灌前相似。灌水后土壤含水率增大,灌后土壤两层的含水率均比灌前复杂,灌水后期斑块较多且分布不均,可能与土壤黏粒和粉粒分布不匀有关。对比两土层可看出,20—40 cm 土层土壤含水率分布比表层斑块分布更错乱复杂,其原因可能为研究区位于沙漠地区日蒸发大,其蒸发因素“中和”了土壤含水率的复杂性。图中水分分布大体上都呈现出东西方向较小,且沿正南方向递增的趋势,具有各向异性特征。其原因是研究区区域高层由北向南逐渐降低,导致了研究区南方土壤含水率较高,其东西方向上含水率较低可能是由于该方向上土壤砂粒含量较高,持水性能低。

2.3　合理采样数确定

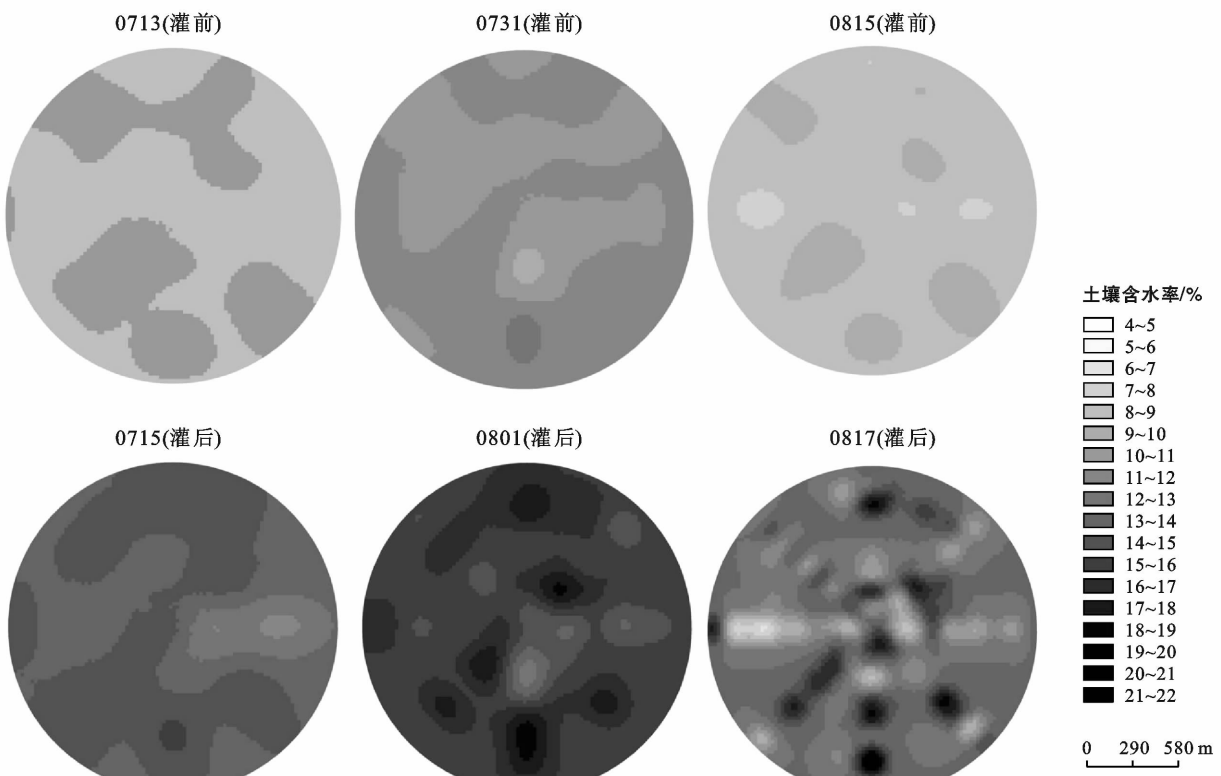
2.3.1　*经典统计学确定合理采样数*　表 5 为采用经典统计学方法计算〔公式(2)〕的 2016 年与 2017 年不同置信水平与估算精度下田间土壤含水率的合理采样数。由表 5 可知,95%置信水平、5%相对误差条件下两年灌前平均合理采样数为 92 个,灌后为 75 个,总平均合理采样数为 84 个。从土壤含水率统计结果可以看出,水分变异系数灌溉前大于灌溉后,20—40 cm 深度大于 0—20 cm 深度。为达到一定的精确度,各情况取样数量也大致是一样的顺序。如 20—40 cm 灌溉前土壤含水率的变异系数最大,则要求的取样数量也最多。在 95%置信水平、5%相对误差条件下,2016 年 8 月 15 日为 128 个土壤样本,2016 年 7 月 13 日两土层变异系数接近,因此其采样个数也接近,都约为 95 个。而在同等条件下,最低只需要 44 个。随着所要求的置信水平和相对误差降低,土壤含水率的合理取样数目都较大幅度的下降,如 2016 年 7 月 31 日 20—40 cm 土层深度,5%相对误差 95%置信水平条件下需要 91 个土壤含水率的采样数量,而在 10%的相对误差时只需要 23 个土壤含水率的采样数量。

2.3.2　*随机采样克里格插值确定合理采样数*　为了评价随机选择 29,42,58,73,87,116 采样点进行克里格差值的预测精度,图 4—5 分别为克里格插值的 RMSE 和 R^2 的关系图。由图 4—5 可知,总体上,在 2016 和 2017 年中,不同采样数量所计算的灌水前期和后期平均土壤含水率的 RMSE 和 R^2 均表现相似,随着采样数的增多,RMSE 值均逐渐减小,而 R^2 则呈现逐渐增大趋势。采样点从 29 增加到 87 个时,在灌溉前期 RMSE 由约 5.5%快速减小到约 4%,R^2 由约 50%快速增加到约 70%;在灌溉后期 RMSE 由约 4%快速减小到约 3%,R^2 由约 50%快速增加到约 70%。当采样点大于 87 个时,RMSE 和 R^2 的值均趋于稳定,在灌水前期 RMSE 趋近于 4%,R^2 趋近于 70%,在灌水后期 RMSE 趋近于 3%,R^2 趋近于 70%,这表明当采样点数大于 87 时,该研究区域平均土壤含水率的计算值与真实值的误差很小。因此,随机采样克里格插值确定的该区域计算平均土壤含水率的合理采样数为 87。传统方法计算合理采样数的原理比较简单,操作方便,但不同的取样位置或不同的取样数量将会产生不同的结果,可靠性较差,采用随机采样克里格插值

确定合理采样数是根据实测数据进行大量数值模拟，得到的统计结果，可靠性较高，参考价值较高，但工作量较大，复杂，繁琐。因此，在有条件情况下采用随机采样克里格插法确定合理采样数较好。



a 0—20 cm土层



b 20—40 cm土层

图 3 2016 年马铃薯各生育期不同土层土壤含水率分布

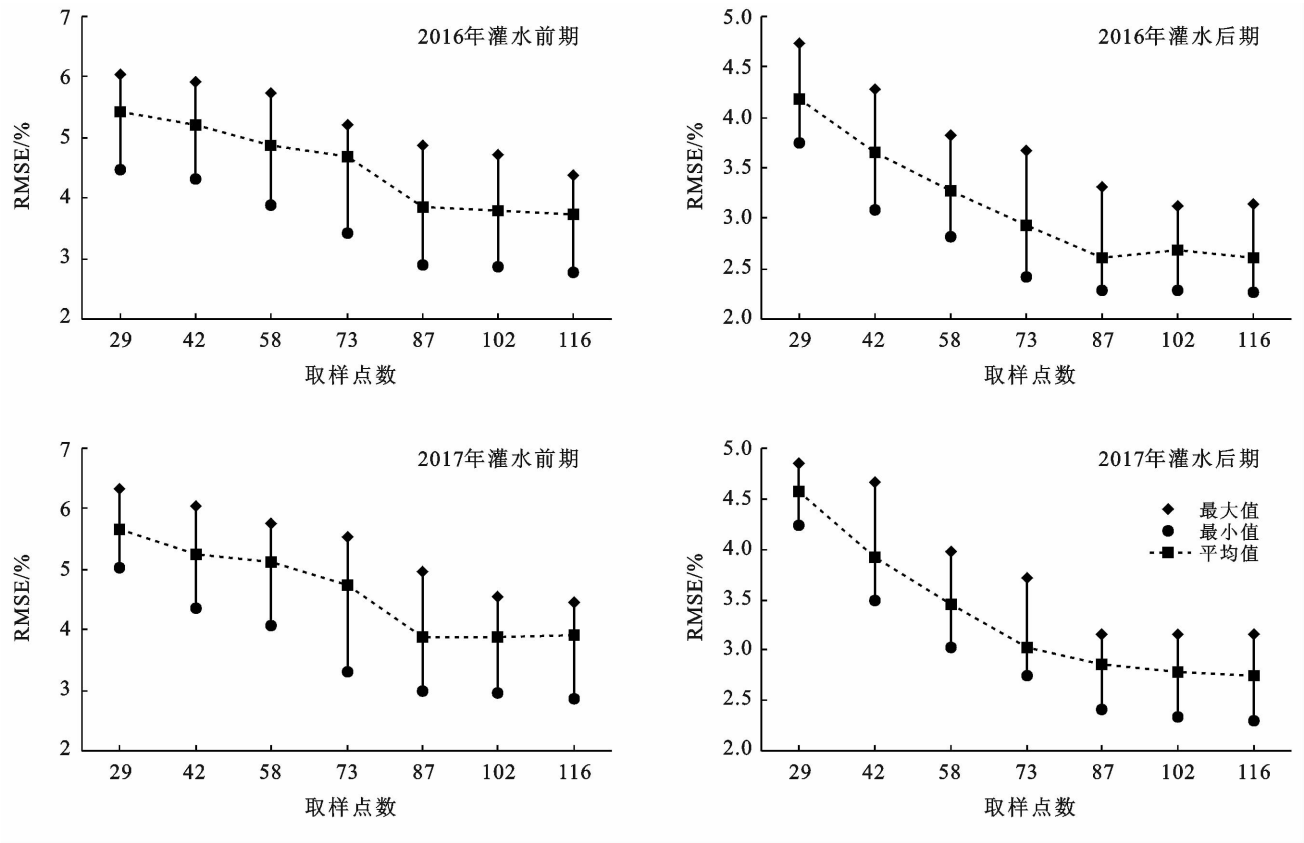


图 4　2016 和 2017 年灌水前期与后期采样点个数与 RMSE 关系

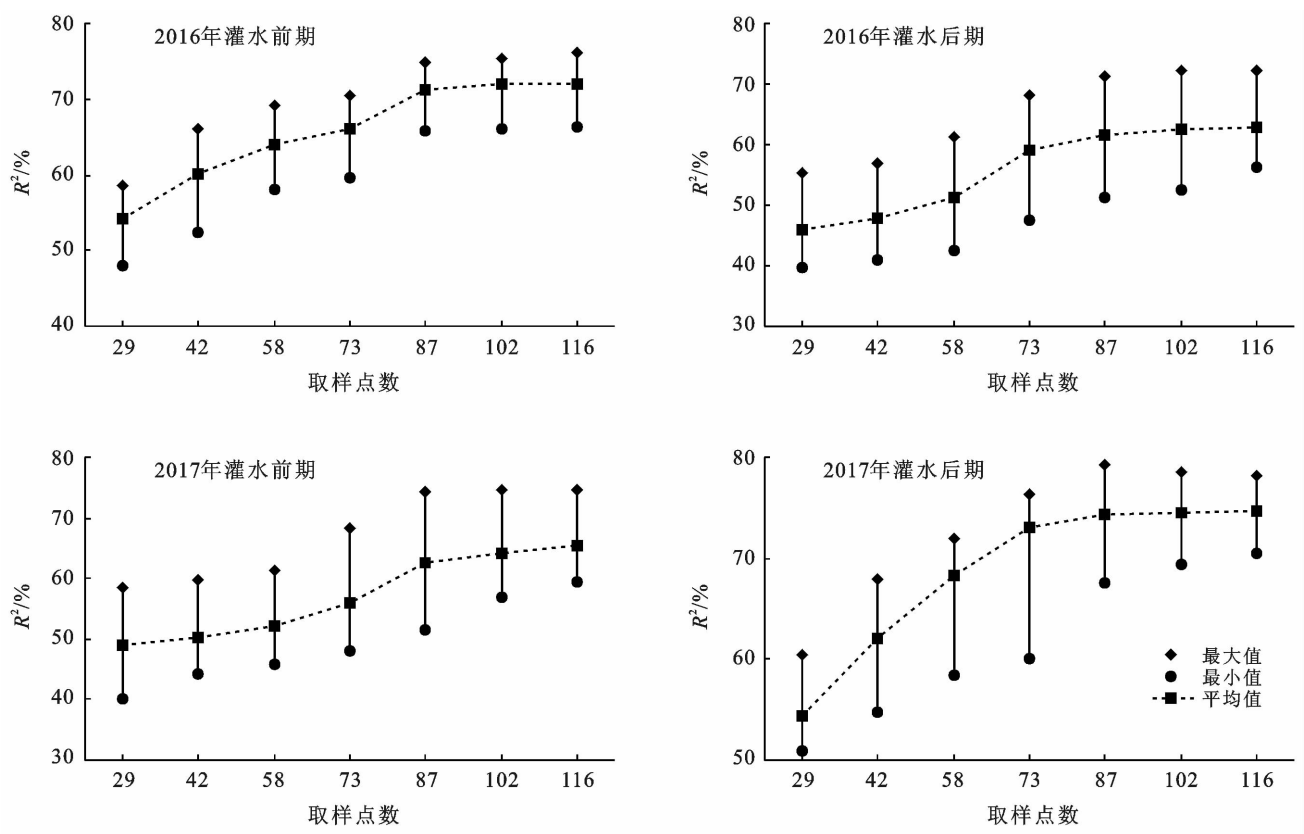


图 5　2016 和 2017 年灌水前期与后期采样点个数与 R^2 关系

表 5 在不同置信水平与估算精度下采用经典统计学方法计算的土壤含水率合理采样数

项 目	土壤深度/cm	采样日期	$p=90\%$		$p=95\%$	
			$d=5\%$	$d=10\%$	$d=5\%$	$d=10\%$
2016 年土壤含水率	0—20	0713(灌前)	66	17	95	24
		0715(灌后)	63	16	90	23
		0731(灌前)	73	18	104	26
		0801(灌后)	53	13	75	19
		0815(灌前)	85	21	121	30
		0817(灌后)	61	15	87	22
	20—40	0713(灌前)	67	17	95	24
		0715(灌后)	60	15	86	21
		0731(灌前)	64	16	91	23
		0801(灌后)	58	14	82	21
		0815(灌前)	90	22	128	32
		0817(灌后)	75	19	106	27
2017 年土壤含水率	0—20	0515	30	7	43	11
		0623(灌前)	39	10	56	14
		0624(灌后)	33	8	47	12
		0723(灌前)	52	13	74	19
		0724(灌后)	31	8	44	11
		0821(灌前)	40	10	57	14
		0822(灌后)	32	8	46	11
		0911(灌前)	64	16	92	23
		0912(灌后)	45	11	64	16
	20—40	0515	54	13	77	19
		0623(灌前)	64	16	91	23
		0624(灌后)	41	10	59	15
		0723(灌前)	65	16	92	23
		0724(灌后)	68	17	97	24
		0821(灌前)	40	10	58	14
		0822(灌后)	47	12	67	17
		0911(灌前)	90	22	128	32
		0912(灌后)	74	19	106	26

注：p 为置信水平；d 为估算精度。

3 结 论

(1) 整体上两年的土壤含水率变异系数较为一致。马铃薯各时期土壤含水率均表现为中等变异特性，20—40 cm 土层土壤含水率的变异程度略高于 0—20 cm 的土壤；灌溉结束后，土壤含水率变异系数减小且田间土壤平均含水率越高其变异系数越小。

(2) 球状模型可以很好地拟合马铃薯各时期田间土壤水分的分布，连续两年其都表现为中等程度的空间相关性，马铃薯成熟期期块基比相对比较小，田间土壤含水率受随机因素与结构因素共同影响。研究区土壤含水率灌水前期总体上呈斑块状分布特征。同时土壤含水率各向异性显著，在东西方向空间变异相对剧烈。

(3) 经典统计学合理采样数受估算精度的影响显著，且合理采样数数目随着允许误差的增加而降低。20—40 cm 土层合理采样数大于 0—20 cm 土层，同时灌前大于灌后。运用地统计学方法分析合理采样数更加合理准确，两年结果均表明合理采样数为 87 个适宜。

[参 考 文 献]

[1] Huisman J A, Sperl C, Bouten W, et al. Soil water content measurements at different scales: Accuracy of time domain reflectometry and ground-penetrating radar [J]. Journal of Hydrology, 2001,245(1/4):48-58.

[2] 李宝富，熊黑钢，龙桃，等. 新疆奇台绿洲农田灌溉前后土壤水盐时空变异性研究[J]. 中国沙漠，2012,32(5):1369-1378.

[3] 邢旭光，赵文刚，柳烨，等. 猕猴桃果园不同采样密度下土壤含水率空间变异性研究[J]. 农业机械学报，2015,46

(8):138-145.

[4] 任彦秋,李涛,冷栋,等. 干旱区葡萄园土壤含水率时空变异性研究[J]. 水力发电学报,2016,35(3):47-55.

[5] 张仁铎,空间变异理论及应用[M]. 北京:科学出版社,2005.

[6] Famiglietti J S, Rudnicki J W, Rodell M. Variability in surface moisture content along a hill slope transect: Rattlesnake Hill, Texas [J]. Journal of Hydrology, 1998, 210(1/4):259-281.

[7] 蒋超,钱亦兵,杨海峰,等. 古尔班通古特沙漠南缘浅层风沙土含水量空间变异[J]. 干旱区研究,2009,26(4):519-525.

[8] Andrew W W, Cunter B, Rodger B G. Geostatistical characterisation of soil moisture pattens in Tarrawarra catchment [J]. Journal of Hydrology, 1998,205(1/2):20-37.

[9] Fitzjohn C, Ternan J L, Williams A G. Soil moisture variability in a semi-arid gully catchment: Implications for runoff and erosion control [J]. Caterna, 1998, 32(1): 55-70.

[10] Petrone R M, Price J S, Carey S K, et al. Statistical characterization of the spatial variability of soil moisture in a cutover peatland [J]. Hydrological Processes, 2010,18(1):41-52.

[11] 王改改,魏朝富,吕家恪. 四川盆地丘陵区土壤水分空间变异及其时间稳定性分析[J]. 山地学报,2009,27(2):211-216.

[12] Minha C, Jennifer M J. Soil moisture variability of root zone profiles within SMEX02 remote sensing footprints [J]. Advances in Water Resources, 2007, 30(4): 883-896.

[13] Brocca L, Morbidelli R, Melone F, et al. Soil moisture spatial variability in experimental areas of Central Italy [J]. Journal of Hydrology (Amsterdam), 2007, 333(2/4):356-373.

[14] Liao Kaihua, Zhou Zhiwen, Lai Xiaoming, et al. Evaluation of different approaches for identifying optimal sites to predict mean hillslope soil moisture content [J]. Journal of Hydrology, 2017,547(4),10-20.

[15] Wang Jinman, Yang Ruixuan, Bai Zhongke. Spatial variability and sampling optimization of soil organic carbon and total nitrogen for Minesoils of the Loess Plateau using geostatistics [J]. Ecological Engineering, 2015,82(9):159-164.

[16] 齐雁冰,常庆瑞,刘梦云,等. 县域农田土壤养分空间变异及合理样点数确定[J]. 土壤通报,2014,45(3):556-561.

[17] 谢宝妮,常庆瑞,秦占飞. 县域土壤养分离群样点检测及其合理采样数研究[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(2):56-61.

[18] 戚春华. 干旱半干旱地区牧草喷灌均匀特性与管网系统优化研究[D]. 北京:北京林业大学,2007.

[19] 赵文举,李晓萍,范严伟,等. 西北旱区压砂地土壤水分的时空分布特征[J]. 农业工程学报,2015,31(17):144-151.

[20] 李宝富,熊黑钢,张建兵,等. 干旱区农田灌溉前后土壤水盐时空变异性研究[J]. 中国生态农业学报,2011,19(3):491-499.

[21] 李芳松,雷晓云,陈大春,等. 膜下滴灌棉田土壤水分空间变异规律研究[J]. 灌溉排水学报,2010,29(6):68-71.

(上接第 221 页)

[7] 崔邢涛,许皞. 基于农用地分等定级的耕地占补平衡理论研究[J]. 国土资源科技管理,2005,22(3):21-24.

[8] 周亚鹏. 不同农业生态区耕地占补平衡质量评价及测算方法研究:以河北省燕山山前平原区和冀西北间山盆地区为例[D]. 河北 保定:河北农业大学,2005.

[9] 张桂川. 凌源市补充耕地数量质量按等级折算系数研究[J]. 国土与自然资源研究,2017(1):23-24.

[10] 王立君. 贵州高原区紫云至望谟高速公路耕地占补平衡折算[J]. 浙江农业科学,2018,59(9):1631-1634.

[11] 孙萍,盖兆雪,张景奇. 县域耕地后备资源调查评价及补充耕地潜力分析[J]. 中国农业资源与区划,2017,38(11):145-152.

[12] 高星,吴克宁,陈学砧,等. 土地整治项目提升耕地质量可实现潜力测算[J]. 农业工程学报,2016,32(16):233-240.

[13] 陈海燕,彭云,郑宏刚,等. 补充源与耕地数量质量按等级折算的应用研究:以大理至丽江铁路为例[J]. 中国农业资源与区划,2014,35(1):109-113.

[14] 高星,吴克宁,郧文聚,等. 县域耕地后备资源与规划期内数量质量并重的占补平衡分析[J]. 农业工程学报,2015,31(12):213-219.