第1章　绪论

1.1　防御涝渍灾害的重要意义

我国是世界上涝渍灾害频繁而严重的国家之一,全国涝渍灾害面积平均每年达1亿多亩，使粮棉油减产占全国总产量的5%。据有关资料统计，全国中低产田面积共有8.45亿亩，其中易涝耕地3.66亿亩，渍害1.15亿亩，这说明涝渍灾害是导致农田低产的主要原因之一，产量低而不稳，严重制约着农业生产的发展和人民生活水平的提高。

我国涝渍农田主要分布在北方地区的东北三江平原和松嫩平原、辽河中下游平原、黄淮海平原等；南方地区的沿江平原圩区、滨湖地区、临海地区，珠江三角洲以及山丘区的冲垄地等。涝渍灾害的主要治理措施是根据农作物对农田水分状况的要求，修建排水系统，及时排除农田中多余的水分，为农作物生长创造良好的环境。全国已不同程度地治理易涝耕地3.1亿亩，治理渍害田5 000多万亩。治理后亩产增幅一般在100kg以上，并且生态环境也有明显改善，为农业增产打下了良好的基础，取得了明显的经济效益和社会效益。仅1996年到1998年三年通过农田排涝，使约3亿亩农作物避免或减轻了涝灾损失，排涝减灾效益达800多亿元。湖北江汉平原的四湖地区，改造渍害低产田后增产达30%～40%，每亩增产粮食100～150kg，高的可达200kg。

但是，目前农田排水的治理标准一般偏低，仅有一半左右达到五年一遇除涝标准，而且由于工程老化，年久失修等原因，有些工程的排水能力只有设计标准的40%左右，治渍标准更低，故当前农田排水防御涝渍灾害的能力还远不能适应我国农业发展的要求。涝渍灾害已成为制约我国不少地区农村经济发展和摆脱贫困的重要

需要全本请访问 www.ertongbook.com

因素。因此，提高防御涝渍灾害的能力，对加速发展农业生产有着重要的现实意义和战略意义。

1.2 涝渍灾害防御技术的发展及攻关目标

我国农田排水的实践及认识过程中，首先是开展了对农业生产造成严重损失的内涝灾害治理，修建了大量明沟排水工程，对保障当地农业生产发挥了重要作用。但是，有些已解决了涝灾威胁的农田，虽然可以保收，产量却不高，究其原因，大多是由于地下水位过高，土地过湿，形成渍害。这些农田要提高产量，重要措施之一是合理调控地下水动态，使农田保持良好的通气条件。此后开展了以治渍为目的的农田地下排水试验研究和工程建设。基于上述历史特点，我国农田排水规划设计中，在排水设计指标及排水措施的应用上都是采取涝渍分别治理。

在排水设计指标上，存在着涝、渍各自独立的标准，即以排除地面水为主的排涝标准和以治渍为主的排渍标准。目前应用最广的是：排涝以涝区发生某一设计频率的暴雨而不受涝为准；治渍则采用地下水位下降速度指标确定设计值。我国 1999 年发布的国家标准《灌溉与排水工程设计规范》中规定：排涝标准的设计暴雨重现期一般是采用 5～10 年，经济条件较好或有特殊要求的地区，可适当提高标准；经济条件目前尚差的地区，可分期达到标准。设计暴雨历时和排除时间，旱作区一般可采用 1～3 天暴雨和从作物受淹起 1～3 天排至田面无积水为标准；水稻区一般可采用 1～3 天暴雨经 3～5 天排至耐淹水深为准。排渍标准旱田设计排渍深度可取 0.8～1.3m；水稻田设计排渍深度可取0.4～0.6m；旱作物耐渍深度可取0.3～0.6m，耐渍时间3～4天为准。水稻田适宜日渗漏量可取2～8mm/天为准。有渍害的旱作区，农作物生长期地下水位应以设计排渍深度作为控制标准，但在设计暴雨形成的地面水排除后，应在旱作物耐渍时间内将地下水位降至耐渍深度。水稻区应能在晒田

期内 3～5 天，将地下水位降至设计排渍深度。至于将涝渍两者统一起来确定的排水设计标准，在我国仍是一片空白。

在排水措施上，从单一明沟排水发展到明沟、暗管、鼠道、竖井等多种类型的排水措施，而对各种排水措施在改造中低产田中的作用及发展等方面则有了明确的认识。

明沟仍是当前我国运用最广泛的一种排水措施，它有排涝、排渍、排盐、蓄水、滞水、控制地下水位等多种功能。它的主要缺点是占地多、易滑坡、养护难。各地因地制宜总结并制定了防御涝渍灾害的明沟排水系统技术方案。

暗管排水由于暗管埋于地下，具有不占耕地、使用年限长、便于田间耕作和方便交通等优点。它可控制地下水位，起到排水治渍排盐的作用。对暗管的管材、裹滤料、施工机械等方面已取得了许多成果。但由于受技术、经济等多种条件限制，目前我国各类型暗管排水面积仅 100 万亩左右。国内外的实践证明，这是农田排水的发展方向。

鼠道排水具有施工简便、造价低廉且对排除犁底层滞水和地面残留积水特别有效，在粘质土地区其治渍效果良好，所以多用作辅助排水措施。对它的适用条件、结构形式、施工方法等方面均取得了许多成果。估计目前全国鼠道排水面积约 70 万亩。

竖井排水在我国主要是井灌井排，具有抽水灌溉，抗旱压盐，控制地下水位，既抑制返盐，又有利于雨季淋盐和缓解涝渍灾害等多种功能。这一措施对干旱、涝渍、盐碱多灾种并存的华北平原等地区的中低产田改造，起着重要作用。

其他排水如机械排水，主要用于解决不能自流排水的低洼地、平原圩区等地的排水出路。线缝沟排水则是用犁刀划破阻水的犁底层以消除上层滞水，多用于临时性辅助排水防渍的措施。

目前生产实践中，一般均根据各地不同灾害类型、不同自然条件、不同技术经济水平，因地制宜地分别应用上述各项排水措施，

进行涝渍灾害的治理。这种涝渍分治的办法，还不能完全防止农作物受涝渍危害或造成的不合理工程投资。

人们在探讨防御涝渍灾害、建设高产稳产农田的生产实践和科学试验中，发现涝渍灾害常紧密相联。在我国大多数受涝渍威胁的地区，往往存在着先涝后渍、涝退渍存、有渍易涝、涝渍并存或交替发生。这种涝渍相伴相随的特点，给农业生产造成的危害不能分别看待或分割处理，必须统筹防御、连续控制，应采用综合手段，实行涝渍兼治。

人们在大面积改造多灾种并存的中低产田的过程中，认识到各种灾种之间往往是相伴共存、相互联系、相互制约。因此，在改造此类中低产田时，必须把各灾种联系起来作为统一的治理对象，由过去单目标治理，发展为多目标综合治理。

针对上述的认识，为我国涝渍灾害防御提出一整套综合治理的组合排水技术，是本专题“九五”国家科技攻关的目标。根据农田排水工程设计中的关键技术，重点提出了以下几项应用技术研究：

①综合防御涝渍灾害的组合排水工程技术：根据所选典型试验区淮北砂姜黑土区主要农作物综合防御涝渍灾害的要求，研究几种主要排水措施明沟、暗管、竖井等排水工程合理的组合，选出防御涝渍效果好、经济效益佳等优化的组合排水工程形式。通过试验、示范，加强推广应用，以提高我国农田防御涝渍灾害的能力。

②涝渍兼治和连续控制的农田排水设计新技术：为改变过去涝渍分治的排水设计技术，根据涝渍兼治和连续控制的要求，研究有效综合治理模式。通过试验观测和分析计算，提出技术合理的组合排水工程设计计算方法，为我国防御涝渍灾害的农田排水工程设计提供科学依据。

③涝渍兼治和连续控制的动态指标研究：针对涝渍两种灾害具有相互紧密伴生，在时间和空间上相随性与连续性的特点，根据不同雨型和降雨分配特点，研究涝渍兼治排水系统的设计指标，和防

治连续多次降雨造成渍害的动态排水设计指标的试验技术，并确定方法，为涝渍兼治工程设计提供技术指标。

④组合排水工程技术经济效益分析：根据典型试验区主要农作物综合防御涝渍灾害的技术要求，通过成果资料分析研究，针对农业涝渍兼治的工程技术措施，研究组合排水工程技术的技术经济效益分析方法，为涝渍兼治工程开发技术的经济效益做综合评估和评价，提供依据。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

第 2 章　涝渍兼治和以动态排水过程为控制指标的农田排水标准的研究

2.1　问题的提出

针对我国特别是南方地区水、旱灾频繁交替出现的情况，国家投入大量资金进行农田水利基本建设。灌溉排水工程的修建和效益的发挥，对保证我国农业生产的持续稳定发展起到了重要的作用。灌溉工程设计标准主要包括灌溉用水保证率和灌溉水质标准两部分。针对我国不同地区和不同作物，已制定了相应的国家标准[1]。总的来说，其设计指标十分明确，进行规划设计和在灌溉系统实时管理运行时，都较容易掌握。我国南方的农田排水问题，就其成因而言，十分复杂，有因外河水位过高，暴雨来临时排泄不及而造成的内涝；有因洪水泛滥，洪水涌向下游而形成的洪涝；有地面水排除后，土层内部水分过多形成的涝后渍水；有由于边界高水位的地表水通过渗漏而使农田形成的渍涝；有山冲田其周边山丘低温地下水使排泄区发生冷浸渍水等等。由于农田水分过多的原因各异，表现形式也不相同，给制定排水设计标准带来相当的难度。相对于因雨涝排水不及，大地汪洋一片、作物严重减产乃至绝收给人们一种强烈灾害的直观感觉而言，农田土壤过湿造成的作物减产程度和给人的直观感觉都轻得多。因此，国家在排水建设过程中首先关注洪涝灾害、建设地面水排水工程，就是理所当然的了。涉及华北地区排水问题，曾专门召开了七省二市的排水协作会议。目前，各省区均制定有相应的排涝设计标准，包括设计暴雨的重现期、允许的排除田面积水的排涝时间等。

排水系统的建设和大型排水泵站的兴建，对消除或减轻地区的洪涝灾害发挥了巨大的作用。随着涝灾威胁的减轻，为了使肥沃土

地的生产潜力得到更充分的发挥，农田土壤过湿的控制问题被提到了议事日程，自 20 世纪 70 年代末以来，一批以治理渍害为主的排水标准研究成果逐渐应用于生产实践，长期在中、低产水平徘徊的农田，找到了根治的途径。如果说，我国的农田排水事业在 70年代以前，侧重点是放在治理涝灾上的话，80 年代后则转入对涝灾治理工程的进一步巩固和逐步提高标准，对渍害给予重视的阶段。由于上述的历史原因，到目前为止，国家正式颁布的涉及农田排水的规范[1]、规 程[2]，都是将排水标准分成排涝标准与排渍标准两部分，与此相配合涉及确定排涝标准与排渍标准的作物受淹试验与受渍试验，其国家行业标准[3]也是将除涝与排渍分开来制定的。

我国南方的渍害田一般可划分为山丘区冲垄盆地渍害田；平原区沿江滨湖渍害田；滨海区江河下游渍害田三种类型区。从渍害成因上，又可分为涝渍型——指地势低洼，排水不畅，雨后地下水回落速度很慢，明涝暗渍相随伴生的农田；潜渍型——指受江、河、湖、海等地表水体水位的制约，在雨后或过量灌溉后，地下水位较长时期内埋深小于作物主要根系活动层而形成渍害的农田；泉渍型——指山区为防止夏季缺水干旱而在田内长期蓄水的沤水田、冬水田或冬泡田；盐渍型——指滨海盐碱地；酸渍田——指南方沿海海涂生长的红树等植物腐烂后形成的酸性土，通常其 pH 值小于 5，当地称之为咸酸田。据湖北、湖南、广西、贵州、福建和上海 6省市渍害田类型统计资料[4]（见表 2-1），以涝渍和潜渍两种类型居多，平均分别占渍害田的 29.35%和 28.66%。

涝渍型农田，其灾害往往发生在当地的雨季，由于承泄区（江河、湖泊）处于高水位，雨后排水不及，首先形成内涝。由于雨季时间较长，农田地下水位较高，一场降雨后土壤中的非饱和层很快蓄满，形成地面积水，当雨后地表水排除后才有可能排除地下水。因此，这种渍害农田，作物减产是由涝渍双重作用的结果，在经济评价中，既不能以单纯按受涝减产或按受渍减产进行分析，也不能

分别将两者造成的减产和损失进行简单的叠加。由于作物受淹减产机制与受渍减产机制不同，因此，作物前期受淹情况不同与其后受渍情况不同，所造成的减产损失也不相同。事实上，除了个别地下水排水条件特别好的地方，我国南方沿江滨湖大部分低洼平原地区在雨季农田受涝后都不同程度存在受渍的危害。要评价一个系统的排水效果或者进行排水工程（骨干系统、田间工程以及排水枢纽、抽排容量的选定）规划设计，必须以技术经济分析作为选定方案的依据。在目前排涝工程规划设计中，多以暴雨重现期和作物耐淹能力为依据，进行经济分析。由于仅考虑作物受淹减产而忽略地面水排除后农田是否受渍和受渍的程度，显然，据此所得出的工程经济效益将会偏高，其所选定的设计方案也就不是最优方案。

表 2-1 南方部分省市渍害田类型统计表

类 型	山丘区		平原区		滨海区	
	面积	占本区%	面积	占本区%	面积	占本区%
涝渍	459.88	18.98	554.3	40.35	239.43	50.79
潜渍	350.80	14.47	760.98	55.40	111.70	23.70
泉渍	908.62	37.49	8.85	0.65	3.90	0.83
贮渍	645.85	26.65	46.73	3.40	5.05	1.07
盐渍	31.88	1.57	1.0	0.07	87.93	18.65
酸渍	20.41	0.84	1.78	0.13	23.36	4.96
总计	2417.44	100	1373.64	100	471.37	100

对于涝渍型地区的治渍排水工作，绝大多数是在除涝排水达到一定标准的情况下，为了进一步挖掘农田生产潜力而提出来的。目前，制定的治渍排水标准，针对南北方不同地区、不同作物，提出了设计排渍深度、耐渍深度、耐渍时间和水稻田适宜渗漏量等指标。对于旱作地区，明确规定“农作物生长期地下水位应以设计排渍深度作为控制标准，规定在设计暴雨形成的地面水排除后，应在旱作物耐渍时间内将地下水位降至耐渍深度”[1]。为配合上述设计

标准在生产实践上的应用，各地开展的作物受渍试验，都是针对不同作物适宜地下水埋深或雨后适宜地下水位回降速度进行的。其试验成果包括作物不同生育阶段的适宜地下水控制埋深，或不同地下水自饱和面（一般为地面）下降速度与作物产量的关系等方面。可以看出，这样的试验数据仅符合作物受渍前不受淹的情况。此外，上述单纯考虑排渍的设计标准，在进行经济分析时，遇到的另一个障碍是无法与造成渍害的发生频率相联系。

农田地下水排水工程的主体是在田间，骨干排水网为田间排水提供排泄通道。对于兼顾涝渍排水的系统，田间排水的效果是两套系统共同作用的结果，将二者人为地割裂开来，尽管是按相应的设计标准进行分析计算，其所得的结果必然不符合实际，要么效益估计过高，工程完成后达不到预期目标；要么效益估计过低，无谓地加大工程投资。正确的方法应该是：在排水系统的设计中把地表水的排除与雨后的地下水排水统一起来。无论是进行技术经济分析或是排水系统的运行管理，都应将涝与渍对农作物产生的影响作为一个统一目标予以考虑。

在潜渍型渍害农田，农作物生长的主要障碍是土壤（主根层）过湿，土壤通气率过低，结果造成供氧不足，引起根呼吸和总根体积减少，增加了通过根系输送水分和养分的阻力，并在土壤和植物中形成有毒化合物，持续的通气不良导致细胞的死亡和细胞渗透率降低，甚至造成根的死亡。因此，潜渍型的渍害田治理的任务是改善土壤的通气状况，最直接的控制方法是以土壤含水率（或土壤通气率、充气孔隙率）作为控制指标，国外学者根据空气在土壤气相中的扩散作用（即要求最低的氧气扩散率），提出最低的土壤通气率应在 8% ~ 15%之间。土壤通气率指标虽然具有明确、直观的优点，但却不易进行控制。我国绝大多数研究者都集中在探讨通过调控地下水位的方法来改善渍害田的生长条件。《农田排水技术规程（南方农田暗管排水部分）》（SL15 – 90）提出以地下水位下降速度

为设计指标，即针对不同作物不同的设计控制阶段，规定在某一允许排水时间内地下水埋深达到的数值。在主根层以下，地下水位埋深对作物生长没有直接的影响，但它却间接地决定着根层的水分状况，从而影响到作物水分的供应以及土壤中通气和热状况，更重要的是地下水位容易掌握和调控，因此，将其作为控制指标进行设计或进行水管理是比较科学的。但现行控制标准中仅规定了地下水位某一次上升后回落的时间，没有考虑多次地下水位升降的情况，这对我国南方春夏之间梅雨季节降雨分配情况是不合适的。在这个季节中，每次雨量并不大，但却较频繁，常常是阴雨连绵，土壤过湿再加上温度不高，对作物产量的影响很大。如湖北江汉平原地区冬小麦生长期基本上不需要人工灌溉，但产量一直不高，就是因为这样的天气条件再加上农田不良的排水条件所造成的，长江中下游平原地区也有类似的情况。

荷兰学者西本（Sieben，1964）以整个作物生育阶段（或作物主要生育阶段）为统计期，以地下水埋深浅于某一定值（如 30cm）累计时间，来反映农田受渍程度，以连续的地下水动态统计值作为控制指标，据此进行地下水排水工程的设计。这种方法较好地解决了渍害的成因是多次连续降雨的问题，解决了前述一次降雨地下水降速的设计标准不再合适的问题。我国以连续动态排水过程为控制指标的研究起步较晚，为填补这一空白，故将其列入本次攻关研究课题中。

2.2 连续降雨型地区排水设计指标及设计标准研究

在我国南方沿江、滨湖、水网地区，地势低洼，地下水位高，在4～6月份（一般称为梅雨季节），农田排水不畅，虽然降雨强度不如雨季高，但降雨次数多，连绵的降雨使得越冬作物（冬小麦）生长环境十分恶劣。据统计，湖北省在开春之后冬小麦几乎不需要灌溉，但产量不高，究其原因就是梅雨季节降雨过于频繁，地下水

持续处于高水位状态，使得土壤通气不良，形成渍害农田（如图 2-1）。以一次降雨地下水回落速度作为排水系统的控制指标，不能反映持续高水位状态下作物受渍减产的情况。

有别于以一次降水的排水过程作为设计指标，西本（Sieben，1964）提出了以地下水动态过程的累计超标水位 SEW_x 作为排水控制指标的概念。希勒（Hiler，1969）、张蔚榛（1997）等提出以累计超标水位为基础的抑制日指标（SDI）和累积减产指标（CRI），建立与作物相对产量的关系，为潜渍型排水地区排水标准的制定提供了新的途径。本节结合上海青浦和安徽蚌埠两地试验情况，对该方法的应用进行详细介绍。

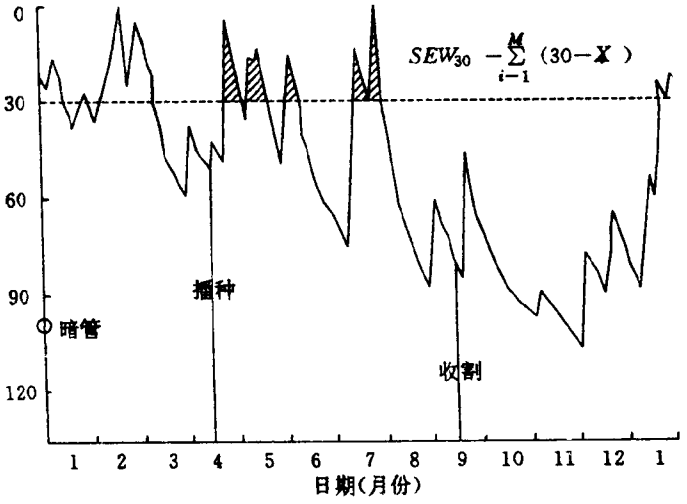

图 2-1 地下水埋深过程线

2.2.1 累计超标地下水位动态指标

排水系统设计所依据的排水标准，必须根据作物产量与排水指标的关系，依照国民经济发展需要，通过技术、经济及社会效益分析加以确定。因此，选定适当的排水指标，具有重要的意义。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

2.2.1.1 作物不同生长阶段农田地下水位连续动态与作物产量关系的国内外研究进展

排水的目的在于排除降雨产生的地表积水，避免由于地下水位过高和土壤过湿引起作物减产而造成的灾害损失。

农田土壤含水率或土壤通气率是农田排水的最直接的指标。但由于土壤含水率的测定和调控均有一定困难，目前应用较多的指标为地下水适宜埋深。

国内外现有排水标准，多以一次降雨后地下水位的下降过程为依据，以雨后一定天数内地下水位下降至一定深度为指标。我国《农田排水技术规程》[2]中 3.1.3 条规定，小麦、棉花等主要农作物的地下水位下降速度控制指标如表 2-2 所示。但多年实践表明，雨季常常发生多次连续降雨和持续高地下水位，以一次降雨的水位控制标准与产量关系确定设计标准，能否反映实际情况尚需深入研究。

表 2-2 主要农作物地下水位下降速度控制指标

作物种类	控制的生长阶段	允许排水时间 (d)	要求达到的地下水位埋深 (m)
棉花	花龄期及以后	3～5	0.9～1.2
小麦	拔节期及以后	3～6	0.8～1.0
水稻	晒 田 期	3～5	0.4～0.5

荷兰人西本 Sieben（1964）研究了小麦和大麦相对产量与当年 10 月至翌年 3 月期间，日地下水位埋深小于 30cm 的累计值 SEW_{30} 的关系。1969 年 Sieben 提出了同时考虑持续天数和作物不同生长阶段对渍害敏感程度的抑制天数指标（*SDI*）的排水标准。近年来，美国的 Skaggs，Evans[5]（1992，1993）和 Kanwar（1992）对玉米产量与 *SDI* 的关系进行了研究，取得了一定成果。我国在以作

物不同生长阶段的抑制天数为农田排水控制指标并建立与作物产量关系的研究方面，尚处于起步阶段。

（1）地下水位累积超标深度 SEW_x）

在作物生长季节，由于多次降雨形成地下水持续高水位时，作物生长将受到抑制而减产，Sieben 以地下水埋深为 30cm 作为分界点，统计小于 30cm 的地下水埋深的累积值为排水指标，求得小麦、大麦和豆类等多种作物产量与 SEW_{30}的关系。SEW_{30}（cm·d） 可用下式表示：

$$SEW_{30} = \sum_{j=1}^{N} (30 - D_j) \qquad (2-1)$$

式中，D_j 为第 j 天的地下水埋深（cm）；N 为作物生长季节（或生长阶段）总天数（d）。

在 SEW_{30}的计算中，仅计入地下水埋深 D_j 小于 30cm 的天数，埋深 D_j 大于 30cm 时不予计入。根据荷兰的情况，在 SEW_{30}不超过 200cm·d 时，作物不会减产。1978 年 Skaggs 在排水模型 DRAINMOD 中也曾采用 SEW_{30}作为排水指标，并以玉米生长期内 SEW_{30}小于 100cm·d 作为设计标准。

（2）抑制天数指标 SDI

在 SEW_x 中仅考虑了在作物生长期内或一定生长阶段内，各日地下水位埋深小于 Xcm（如 30cm 或 50cm）的累积值的大小。但作物在不同生长阶段对于地下水位过高所造成的渍害敏感程度是不同的，所以，在同样的 SEW_x 的情况下，发生在不同的生长阶段，其受渍减产的程度是不同的。为了在排水控制指标中考虑生育阶段的敏感程度，Hiler[6]（1969）提出了以抑制天数为指标的概念。该指标可用下式表示：

$$SDI = \sum_{i=1}^{N} (CS_i \times SD_i) \qquad (2-2)$$

式中：N 为具有明显作物生理特点的生长阶段数；SD_i 是第 i 个生长阶段的抑制天数因子，（cm·d）；CS_i 是第 i 个生长阶段的作物敏

感因子。

①在现有排水模型中多以 SEW_{30}作为抑制天数因子 SD_i，仍用(2－1)式计算，即

$$SD_i = \sum_{j=1}^{m} (30 - D_{ij}) \qquad (2-3)$$

式中：D_{ij}为第 i 个生长阶段中第 j 天的地下水位埋深（cm）；m 为第 i 个生长阶段的总天数（d）。

②作物的敏感因子 CS_i，反映作物对单位抑制天数指标的敏感程度，其值随作物的种类和生长阶段而异，可通过试验确定。Hiler 提出，CS_i 用下式计算：

$$CS_i = \frac{Y - Y_i}{Y} \qquad (2-4)$$

式中：Y 为作物未受抑制对照区产量（kg/m^2）；Y_i 为作物在第 i 个生育阶段受到临界抑制的产量（kg/hm^2）。

由于作物产量除受渍外还可能受其他因素影响，如遗传基因、土壤类型、肥料、温度等，为消除这些因素的影响，Evans 等(1990)[7]提出了概化敏感因子 NCS_i 概念，NCS_i 可用下式计算：

$$NCS_i = CS_i / \sum_{i=1}^{N} CS_i \qquad (2-5)$$

国外关于玉米和大豆作物的敏感因子的试验研究较多，例如 Mukhtar 等（1990）对玉米进行了 4 个生育阶段的受渍试验，各阶段采用的受渍时间、求得的敏感因子 CS_i 和概化敏感因子 NCS_i 如表 2-3 所示。

根据作物各生长阶段抑制天数因子 SD_i 和敏感因子 CS_i（或 NCS_i），即可计算相应的抑制天数指标 SDI 再根据实测的相对产量 R_y，即可建立 R_y 与 SDI 关系的表达式。例如 Evans 等（1993）根据在美国卡罗莱纳州、俄亥俄州和印度等地的玉米相对产量 R_y 与抑制天数指标 SDI 的试验资料，通过线性回归，求得以下关系式：

$$R_y = 1 - 0.0071SDI \qquad (2-6)$$

式中：R_y 和 SDI 为玉米受渍后的相对产量和抑制天数指标。

表 2-3 美国爱荷华州玉米敏感因子 CS_i、NCS_i

（Nukhtar 等 1990）

生长阶段	自播种起算的受渍起止时间（d）	CS_i	NCS_i
发育初期	36～46	0.64	0.45
发育后期	56～66	0.44	0.31
开 花 期	76～86	0.15	0.11
结 果 期	100～110	0.19	0.14

（3）累积减产指标 CRI 及其与产量的关系

①减产速率因子 YR：现有的敏感因子的概念，指在某种临界水分抑制状态下作物减产量与非抑制状态下产量的比值。抑制天数指标 SDI 的计算只是一种经验的方法，物理意义不够明确。试验表明，在不同的生育阶段，作物敏感因子是不相同的。但在同一生长阶段，在不同的 SEW_{30} 与作物的相对产量 R_y 近似成直线关系。直线的斜率表示相对产量减少速率，可称为减产速率因子 YR，以%（cm·d）表示。

②累积减产指标 CRI：是建立在 SEW_{30} 基础上，反映相对产量与减产速率因子 YR 关系的指标，可用下式表示：

$$CRI = \sum_{i=1}^{n} YR_i \times \sum_{j=1}^{N} (30 - D_{ij}) \qquad (2-7)$$

式中符号意义同上。

③累积减产指标与作物相对产量之间具有良好的线性关系，可由试验资料求得其关系式的模式为

$$R_y = 1 - \alpha CRI \qquad (2-8)$$

式中：α 为 R_y 与 CRI 关系直线的斜率。

2.2.1.2 作物不同生长阶段农田水分指标与作物产量关系的田间试验

（1）上海青浦试验

①试验简介：自 90 年代以来，在上海青浦农田水利试验站进行了多种形式的作物受渍减产试验，包括：

ⓐ小麦适宜地下水埋深试验：小麦适宜地下水埋深试验分别在圆形测筒（面积 3000cm^2）和长方形测坑（2m×3m）内进行。

测筒内进行地下水定水位条件下小麦受渍试验，共设 9 种处理，即地下水埋深保持在 0.1、0.2、0.3、0.4、0.6、0.8、1.0、1.1 和 1.5m。两次重复。根据历年试验结果来看，各年最高产量都发生在地下水埋深为 0.8m 的处理。但由于各年气象条件不同，在作物需水临界期，即使保持同一地下水位，其土壤剖面上含水率也不相同，产生最高产量的地下水埋深也会有所差异。

小麦不同的生长阶段要求的适宜地下水埋深也是不同的。在播种至拔节期，需较高土壤含水率。苗期地下水埋深应控制在0.2～0.4m 左右。分蘖期地下水埋深以 0.4～0.6m 为宜。孕穗成熟期地下水埋深为 0.8～1.1m 时，成穗率高，产量高。

ⓑ作物产量和降雨后水位下降速度关系的试验：为了分析雨后地下水位下降速度与产量的关系，试验站于 1992～1993 年度在测坑中进行了不同地下水位降速对作物产量影响的试验。其处理为在拔节以后的 4 个生育阶段中各受渍一次，每次受渍时使地下水位上升至地表，分别在 3、5、7、9 天内使水位下降至 0.8m，并测得相应的产量。1993～1994 年度又进行了小麦拔节抽穗期一次受渍对作物产量影响试验。试验处理同上。

ⓒ作物受渍敏感因子试验：为确定小麦各生育阶段受渍敏感因子，于 1994～1995，1995～1996 年度分别在测坑和测筒内进行了敏感因子试验。试验处理为在小麦分蘖开始后的 4 个生长阶段（分蘖期，拔节孕穗期，抽穗扬花期，灌浆乳熟期）分别受渍 7 天，在 7

天内控制地下水埋深在 0～5cm 范围内。在非受渍期间地下水埋深按表 2-4 中处理 Ⅲ进行控制。

表 2-4 小麦各生长阶段地下水位埋深 (m)

处 理	生长阶段			
	播种～拔节	拔节～抽穗	抽穗～乳熟	乳熟～收割
Ⅰ	0.3	0.3	0.3	0.3
Ⅱ	0.3	0.5	0.5	0.5
Ⅲ	0.3	0.5	0.8	0.8
Ⅳ	0.3	0.5	0.8	1.1
Ⅴ	0.8	0.8	0.8	0.8

为了判明在同一生长阶段不同的高水位持续时间（或不同累积超标水位）对产量的影响，1994～1995 年和 1995～1996 年分别在测坑和测筒进行了不同累积超标水位 SEW_{30} 对作物产量影响试验。试验处理中 SEW_{30} 分别等于 50、100、150cm·d。

ⓓ在有控制排水条件下水位波动对作物产量影响试验：试验在小区和大田中进行。小区排水系统由暗管和集水明沟组成。暗管间距 10m，埋深 0.8m。明沟为灌、排两用沟。试验处理为自拔节开始以后各生育阶段明沟水位分别控制在 0.3、0.6 和 0.8m。在暗管之间垂直暗管断面上分别在距暗管 0.5m，L/8（L 为暗管间距），L/4，L/2 处布设观测井，以定时观测地下水位及作物生长状况，并分别测定作物产量。

②试验资料分析

ⓐ作物相对产量与抑制天数因子 SEW 的关系：虽然小麦在不同生育阶段，由于地下水位控制埋深不同和水文年不同其根系分布和最大根深有一定差异，但小麦整个生育期中 87%～96% 的根系集中在 0～30cm 土层内，95%～100% 的根系集中在 0～50cm 土层内。根据根系调查结果，可选定地下水埋深超过 30cm 或 50cm 的累

需要全本请访问 www.ertongbook.com