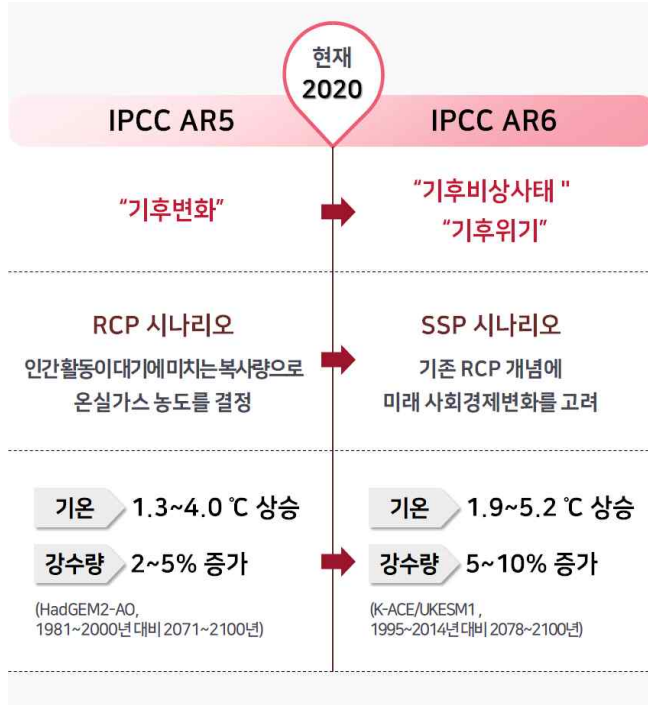

국가 기후변화 표준 시나리오(전지구 및 지역 기후 모델)

□ 개요

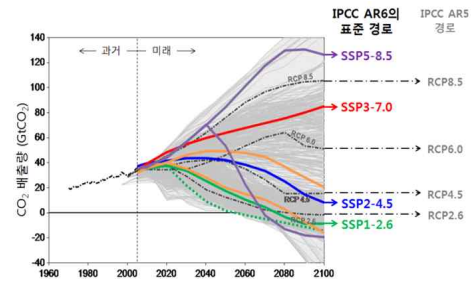
- 생산기관: 국립농업과학원
- 공간영역: 한반도 남한영역
- 사용모델: IPCC CMIP6 포털 제공 18개 전지구기후모형(GCM)

□ 생산 목적

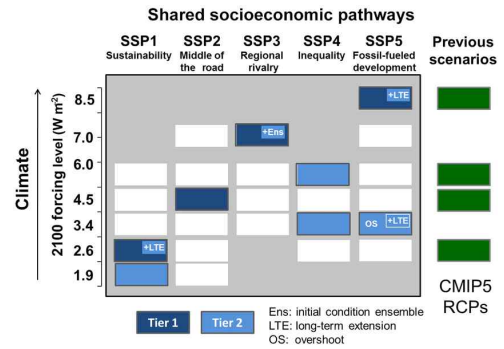
- 국내에서는 2020년 「제2차 국가 기후변화 적응대책(2016~2020)」 완료에 따라 제3차 적응대책 수립의 전환기에 있으며 국제적으로는 IPCC의 제6차 종합보고서(AR6, Sixth Assessment Report)가 2022년 발간예정임
- 기후변화 시나리오의 경우 IPCC 제5차 종합보고서(AR5, fifth Assessment Report)에 사용되었던 RCP (Representative Concentration Pathway) 시나리오는 온실가스 농도변화 경향을 반영한 미래 시나리오이며 최근에는 사회경제적 조건 등에 대한 가정을 동시에 고려한 SSP (Shared Socioeconomic reference Pathway) 시나리오 기반의 CMIP6 자료가 2017년 이후 생산 기관 별로 제공되고 있음 (그림 1)
- SSP 시나리오의 경우 RCP 시나리오와 비교하여 전반적으로 기후변동성이 증가한다는 보고가 있어, SSP 시나리오 자료를 한반도 내 양분유출 취약성 평가를 포함한 농진청 내에서 진행되고 있는 다양한 기후변화 적응 정책 수립에 활용하기 위한 공인된 일단위 기후변화 시나리오 상세화 자료 생산이 필요함
- 기존 농진청 내 기후변화 관련 연구자들의 기후변화 취약성 평가 및 적응 정책 수립에 있어서 불확실성 관련 의견을 고려하기 위해 다중모형 기반의 상세화 자료 제공이 필요함
- 작물생육 모델링과 같이 과거재현기간 대비 미래기간의 상대적인 변화율에 더하여 기후변수들의 물리적인 값이 중요한 경우를 고려하기 위해 통계적 상세화 기법 기반 보정된 상세화 자료 제공이 필요함



(a) IPCC AR5와 AR6의 비교



(b) RCP, SSP 시나리오의 비교



(c) RCP, SSP 시나리오 매트릭스

<그림 1> IPCC AR5와 AR6의 비교

□ 세부 내용

- IPCC 제공 Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6)의 Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) 시나리오 기반 18개 Global Climate Model (GCM) 에 대한 3개 주요변수(강수량, 최고기온, 최저기온) 및 3개 보조변수(풍속, 상대습도, 일사량) 자료 수집

※ 자료출처: <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>

- 통계적 보정은 Empirical Quantile Mapping 기법을 사용하여 월별로 30년 기후 평균과 분포(distribution)를 동시에 보정하는 Simple Quantile Mapping (SQM) 상세화 기법을 적용

※ CMIP5 상세화를 위해 CRAN에 공개한 rSQM R기반 패키지를 CMIP6 SSP

시나리오를 고려할 수 있도록 수정하여 사용함 (rSQM 링크:

<https://cran.r-project.org/web/packages/rSQM/index.html>)

- 통계적 보정을 위해 필요한 관측장으로 CMIP6 재현기간(Historical)을 고려하여 1981~2010년(30년) 관측 자료가 존재하는 60개 ASOS 지점을 활용 (표 1)

※ CMIP6의 과거재현기간 1850~2014년을 고려할 때 30년 평년에 해당하는

1981~2010년의 관측자료를 활용하는 것이 타당하다고 판단함

표 1. 상세화 적용 기상청 종관기상관측소(ASOS) 리스트

번호	관측소 ID	관측점명	북위	동경	번호	관측소 ID	관측점명	북위	동경
1	90	속초	38°15′	128°33′	31	202	양평	37°29′	127°29′
2	100	대관령	37°40′	128°43′	32	203	이청	37°15′	127°29′
3	101	춘천	37°54′	127°44′	33	211	인제	38°03′	128°10′
4	105	강릉	37°45′	128°53′	34	212	홍천	37°41′	127°52′
5	108	서울	37°34′	126°57′	35	221	제천	37°09′	128°11′
6	112	인천	37°28′	126°37′	36	226	보은	36°29′	127°44′
7	114	원주	37°20′	127°56′	37	232	천안	36°46′	127°07′
8	119	수원	37°16′	126°59′	38	235	보령	36°19′	126°33′
9	127	충주	36°58′	127°57′	39	236	부여	36°16′	126°55′
10	129	서산	36°46′	126°29′	40	238	금산	36°06′	127°28′
11	130	울진	36°59′	129°24′	41	243	부안	35°43′	126°42′
12	131	청주	36°38′	127°26′	42	244	임실	35°36′	127°17′
13	133	대전	36°22′	127°22′	43	245	정읍	35°33′	126°51′
14	135	추풍령	36°13′	127°59′	44	247	남원	35°24′	127°19′
15	138	포항	36°01′	129°22′	45	256	주암	35°04′	127°14′
16	140	군산	36°00′	126°45′	46	260	장흥	34°41′	126°55′
17	143	대구	35°53′	128°37′	47	261	해남	34°33′	126°34′
18	146	전주	35°49′	127°09′	48	262	고흥	34°37′	127°16′
19	152	울산	35°33′	129°19′	49	272	영주	36°52′	128°31′
20	156	광주	35°10′	126°53′	50	273	문경	36°37′	128°08′
21	159	부산	35°06′	129°01′	51	277	영덕	36°31′	129°24′
22	162	통영	34°50′	128°26′	52	278	의성	36°21′	128°41′
23	165	목포	34°49′	126°22′	53	279	구미	36°07′	128°19′
24	168	여수	34°44′	127°44′	54	281	영천	35°58′	128°57′
25	170	완도	34°23′	126°42′	55	284	거창	35°40′	127°54′
26	184	제주	33°30′	126°31′	56	285	합천	35°33′	128°10′
27	188	성산	33°23′	126°52′	57	288	밀양	35°29′	128°44′
28	189	서귀포	33°14′	126°33′	58	289	산청	35°24′	127°52′
29	192	진주	35°09′	128°02′	59	294	거제	34°53′	128°36′
30	201	강화	37°42′	126°26′	60	295	남해	34°48′	127°55′

○ 미래 기후변화 전망 자료는 현재까지 수집된 CMIP6 자료 중 18개 GCM에 대하여 GCM 재현기간(1981~2014) 및 SSP 시나리오 4종(SSP126, SSP245, SSP370, SSP585)의 미래기간(2015~2100)에 대하여 수집된 6개 변수(강수량, 최고기온, 최저기온, 상대습도, 일사량, 풍속) 자료 활용 (표 2)

표 2. CMIP6 GCM 리스트

기관(국가)	GCMs	해상도	참고문헌
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (USA)	GFDL-ESM4	360×180	(John et al., 2018)
Meteorological Research Institute (Japan)	MRI-ESM2-0	320×160	(Yukimoto et al., 2019)
Centre National de Recherches Meteorologiques (France)	CNRM-CM6-1	24572 grids distributed over 128 latitude circles	(Voldoire, 2019)
	CNRM-ESM2-1		(Seferian, 2019)
Institute Pierre-Simon Laplace (France)	IPSL-CM6A-LR	144×143	(Boucher et al., 2019)
Max Planck Institute for Meteorology (Germany)	MPI-ESM1-2-HR	384×192	(Schupfner et al., 2019)
	MPI-ESM1-2-LR	192×96	(Wieners et al., 2019)
Met Office Hadley Centre (UK)	UKESM1-0-LL	192×144	(Good et al., 2019)
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australian Research Council Centre of Excellence for Climate System Science (Australia)	ACCESS-CM2	192×144	(Dix et al., 2019)
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (Australia)	ACCESS-ESM1-5	192×145	(Ziehn et al., 2019)
Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (Canada)	CanESM5	128×64	(Swart et al., 2019)
Institute for Numerical Mathematics (Russia)	INM-CM4-8	180×120	(Volodin et al., 2019a)
	INM-CM5-0	180×120	(Volodin et al., 2019b)
EC-Earth-Consortium	EC-Earth3	512×256	EC-Earth Consortium (EC-Earth) (2019)
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology/Atmosphere and Ocean Research Institute/National Institute for Environmental Studies/RIKEN Center for Computational Science (Japan)	MIROC6	256×128	(Shiogama et al., 2019)
	MIROC-ES2L	128×64	(Tachiiri et al., 2019)
NorESM Climate modeling Consortium consisting of CICERO (Norway)	NorESM2-LM	144×96	(Seland et al., 2019)
National Institute of Meteorological Sciences/Korea Meteorological Administration (Korea)	KACE-1-0-G	192×144	(Byun et al., 2019)

□ 미래 기후변화 전망정보

○ 상세화 시나리오 재현성 평가 및 미래기후 예측 결과(그림 2)

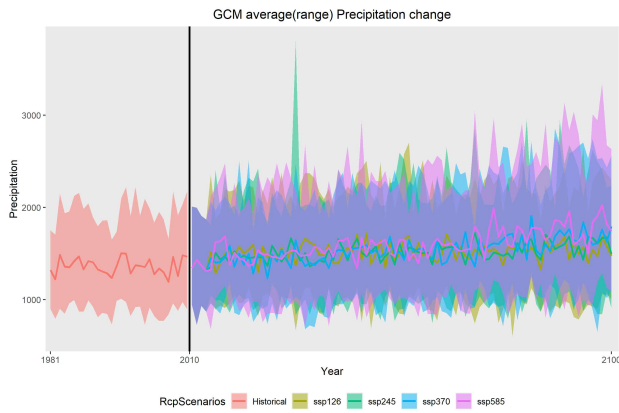
- 6개 변수의 관측소 평균 연변동성 결과 도출
- 강수량 및 기온은 모든 SSP 시나리오에서 미래 기간으로 갈수록 증가하는 경향을 보였으며, 증가율은 SSP5-8.5 시나리오에서 가장 높은 결과를 보임
- 반면 상대습도 및 풍속은 미래기간으로 갈수록 점차적으로 감소하는 결과를 보였으며, SSP5-8.5 시나리오에서 감소폭이 가장 크게 나타남
- 일사량은 과거기간에 대해서는 감소하는 경향을 보이다가 미래 기간 동안에는 다시 증가하는 경향을 보임

○ 재현성 평가 결과(그림 3)

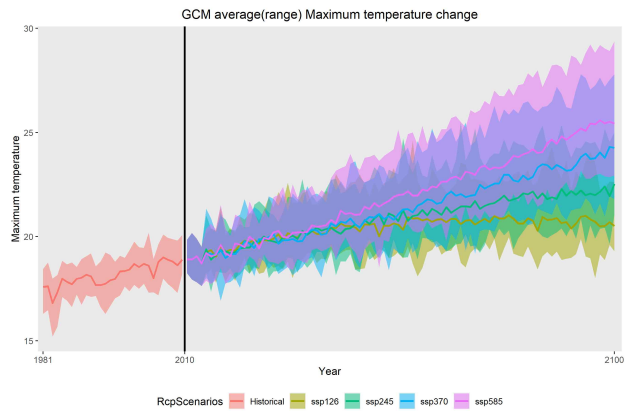
- SQM을 적용하여 통계보정한 결과 관측자료(그림 3의 주황색 boxplot)와 재현자료의 편차가 상당히 보정된 것을 확인함
- APEX/APEX-Paddy 모형을 활용하여 기후변화 시나리오에 따른 미래 농경지 물환경을 평가한 결과 관측자료를 활용한 결과와 재현자료를 활용한 결과에 유의한 차이가 나타나지 않음을 확인함 (표 3~4)

* APEX(Agricultural Policy and Environmental eXtender) 모형 : 기후, 농업활동이 농경지 물, 양분순환에 미치는 영향을 평가하는 process based 모형으로서 미국 USDA-NRCS의 CEAP(Concervation Effect Assessment Project) 정책에 활용되었음

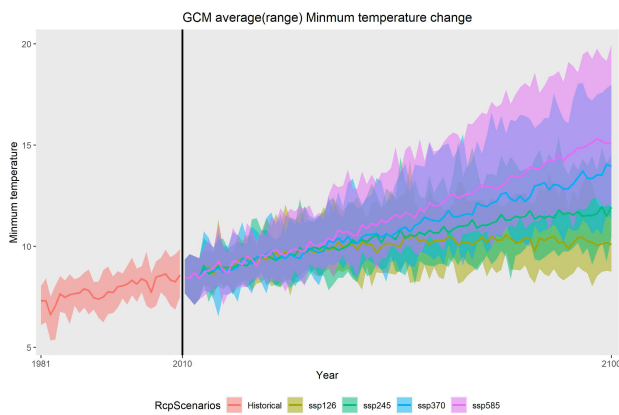
* 통계적 유의성 평가는 Duncan's multiple range test로 5% 유의수준에서 검정함



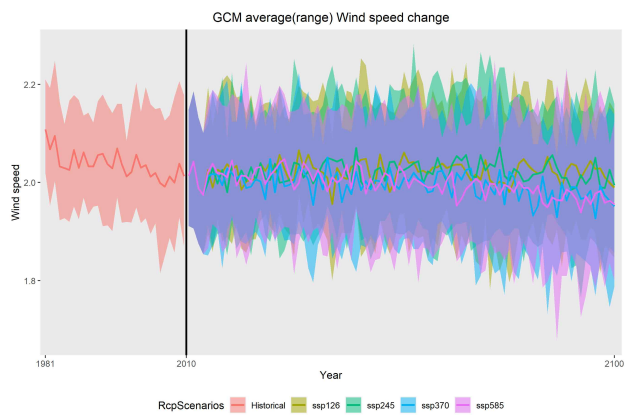
(a) 강수량



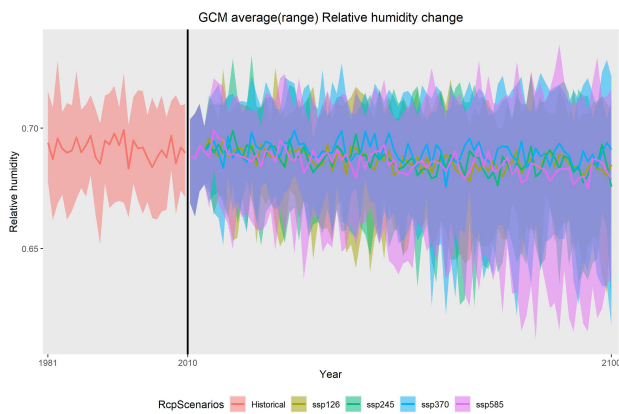
(b) 최고기온



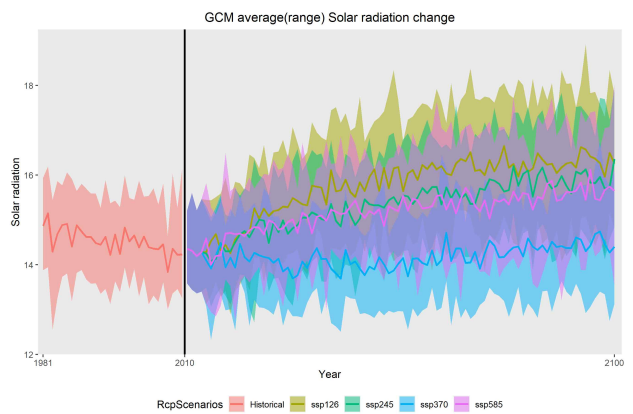
(c) 최저기온



(d) 풍속

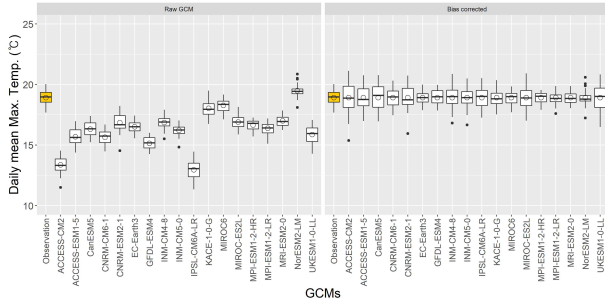


(e) 상대습도

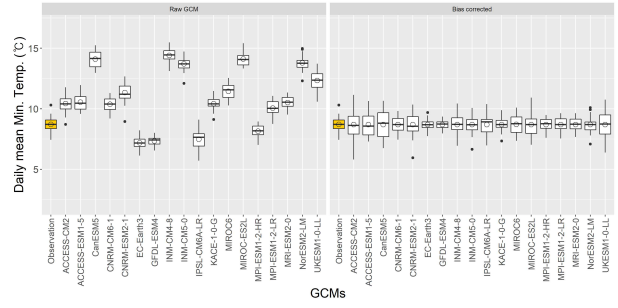


(f) 일사량

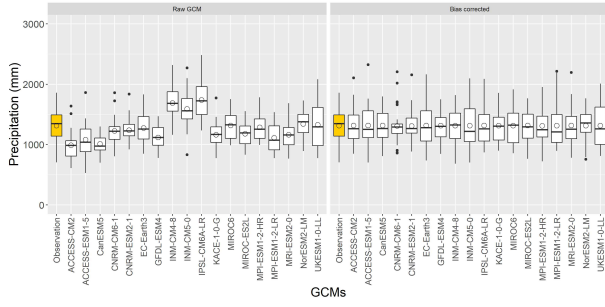
<그림 2> 기상청 관측소 평균을 이용한 기후변수의 과거기간(1981~2010) 및 미래기간(2011~2100) 동안의 연 변화량 분석



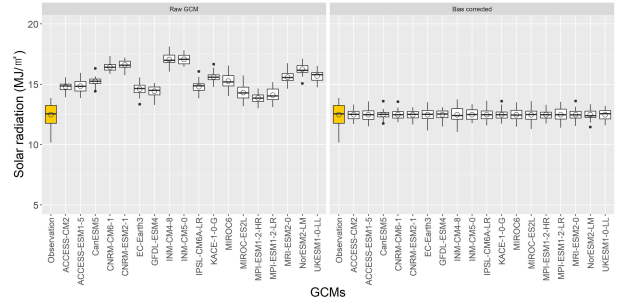
(a) 최고기온



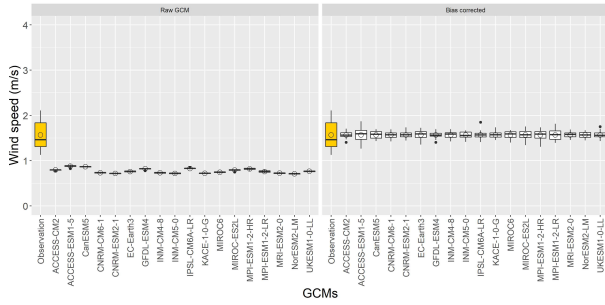
(b) 최저기온



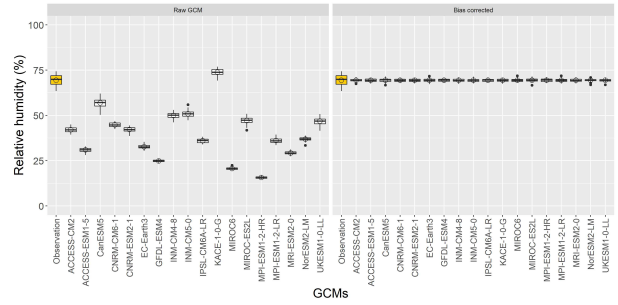
(c) 강수량



(d) 일사량



(e) 풍속



(f) 상대습도

<그림 3> 전주 관측소 대상 과거기간(1981~2010) 기후재현성(통계보정 전/후)

표 3 논 물순환 및 질소유출 기후변화 영향평가 결과

시나리오	시기	증발산량			관개량			유출량			질소 유출 부하량		
		값 (mm)	증가율 (%)	엔트로피	값 (mm)	증가율 (%)	엔트로피	값 (mm)	증가율 (%)	엔트로피	값 (kg/ha)	증가율 (%)	엔트로피
RCP4.5	기준년도	599.0 ^a	-	5.63	780.3 ^b	-	5.90	740.2 ^c	-	7.30	13.4 ^c	-	3.60
	근미래	597.4 ^a	-0.3	5.98	782.1 ^b	0.2	5.83	835.0 ^{ab}	12.8	7.38	16.0 ^{ab}	19.4	3.70
	미래	597.6 ^a	-0.2	5.94	770.6 ^b	-1.2	5.99	871.9 ^a	17.8	7.62	16.5 ^{ab}	23.1	3.65
	먼미래	596.1 ^a	-0.5	5.81	777.7 ^b	-0.3	6.00	902.1 ^a	21.9	7.82	17.7 ^a	32.1	3.74
RCP8.5	기준년도	599.0 ^{ab}	-	5.63	780.3 ^b	-	5.90	740.2 ^c	-	7.30	13.4 ^c	-	3.60
	근미래	604.6 ^a	0.9	5.88	782.8 ^b	0.3	6.08	850.7 ^b	14.9	7.4	14.7 ^c	9.7	3.67
	미래	586.4 ^b	-2.1	5.79	781.5 ^b	0.2	5.93	911.8 ^b	23.2	7.49	17.4 ^b	29.9	3.64
	먼미래	593.3 ^{ab}	-1.0	6.09	770.5 ^b	-1.3	5.97	1060.1 ^a	43.2	7.58	21.5 ^a	60.4	3.75
SSP245	기준년도	598.0 ^c	-	5.27	817.9 ^{bc}	-	6.12	792.3 ^c	-	7.44	13.9 ^b	-	3.61
	근미래	605.7 ^c	1.3	5.45	821.7 ^{bc}	0.5	6.24	870.0 ^{bc}	9.8	7.74	15.6 ^b	12.2	3.95
	미래	639.4 ^b	6.9	5.66	842.3 ^{ab}	3.0	6.34	938.3 ^{ab}	18.4	7.60	15.7 ^b	12.9	3.78
	먼미래	663.4 ^a	10.9	5.74	851.5 ^a	4.1	6.41	1019.3 ^a	28.7	8.08	17.9 ^a	28.8	4.19
SSP585	기준년도	598.0 ^c	-	5.27	817.9 ^b	-	6.12	792.3 ^c	-	7.44	13.9 ^c	-	3.61
	근미래	608.1 ^c	1.7	5.62	822.7 ^b	0.6	6.29	904.8 ^b	14.2	7.56	15.3 ^{bc}	10.1	3.80
	미래	644.4 ^b	7.8	5.76	832.8 ^b	1.8	6.50	978.4 ^b	23.5	7.90	16.8 ^b	20.9	3.79
	먼미래	679.2 ^a	13.6	5.82	862.7 ^a	5.5	6.61	1149.2 ^a	45.0	8.08	19.9 ^a	43.2	4.18

표 4. 경사 밭 물순환 및 양분유출 기후변화 영향평가 결과

시나리오	시기	증발산량			유출량			질소 유출 부하량			인 유출 부하량		
		값 (mm)	증가율 (%)	엔트로피	값 (mm)	증가율 (%)	엔트로피	값 (kg/ha)	증가율 (%)	엔트로피	값 (kg/ha)	증가율 (%)	엔트로피
RCP4.5	기준년도	492.1 ^a	-	5.36	564.5 ^c	-	7.28	81.0 ^b	-	5.30	59.4 ^b	-	5.01
	근미래	498.5 ^a	1.3	5.47	612.5 ^{bc}	8.5	7.41	89.1 ^{ab}	10.0	6.01	64.8 ^{ab}	9.1	5.66
	미래	493.6 ^a	0.3	5.43	679.6 ^{ab}	20.4	7.22	95.7 ^a	18.1	5.51	70.8 ^a	19.2	5.22
	먼미래	494.8 ^a	0.5	5.31	700.7 ^a	24.1	7.59	97.8 ^a	20.7	5.54	72.7 ^a	22.4	5.27
RCP8.5	기준년도	492.1 ^{ab}	-	5.36	564.5 ^c	-	7.28	81.0 ^c	-	5.30	59.4 ^c	-	5.01
	근미래	501.4 ^a	1.9	5.45	621.4 ^{bc}	10.1	7.50	90.1 ^{bc}	11.2	5.58	65.3 ^{bc}	9.9	5.33
	미래	487.7 ^b	-0.9	5.47	698.6 ^b	23.8	7.64	97.8 ^b	20.7	5.68	72.5 ^b	22.1	5.44
	먼미래	470.8 ^c	-4.3	5.53	826.1 ^a	46.3	7.63	111.5 ^a	37.7	5.65	85.7 ^a	44.3	5.46
SSP245	기준년도	453.0 ^c	-	5.17	572.1 ^{bc}	-	7.16	80.8 ^b	-	5.55	54.6 ^{bc}	-	5.24
	근미래	454.1 ^c	0.2	5.46	631.5 ^b	10.4	7.83	89.7 ^{ab}	11.0	6.32	61.3 ^{ab}	12.3	5.94
	미래	465.9 ^b	2.8	5.17	703.8 ^a	23.0	7.33	98.9 ^a	22.4	5.63	67.9 ^a	24.4	5.25
	먼미래	476.9 ^a	5.3	5.28	727.4 ^a	27.1	7.45	100.8 ^a	24.8	5.71	68.8 ^a	26.0	5.35
SSP585	기준년도	453.0 ^{ab}	-	5.17	572.1 ^{cd}	-	7.16	80.8 ^c	-	5.55	54.6 ^{cd}	-	5.24
	근미래	453.8 ^{ab}	0.2	5.68	638.8 ^c	11.7	7.42	89.7 ^c	11.0	5.61	61.7 ^c	13.0	5.24
	미래	461.0 ^a	1.8	5.39	734.9 ^b	28.5	7.64	105.5 ^b	30.6	6.28	72.4 ^b	32.6	5.75
	먼미래	448.5 ^b	-1.0	5.40	835.2 ^a	46.0	7.85	119.5 ^a	47.9	6.22	84.1 ^a	54.0	5.94

□ 관련 사업

- 본 자료는 농촌진흥청에서 유역통합관리연구원 및 노트스퀘어와 공동으로 수행하고 있는 “기후변화에 따른 농경지 양분 유출 영향·취약성 평가(1단계) (2020~2023)” 연구 과제의 “AR6 기반 기후변화 상세화 및 양분유출 모델링 플랫폼 개발” 2차년도(2021)의 연구 결과로 생산되었음

□ 국가 기후변화 표준 시나리오 활용 현황

- 기상청 국가 기후변화 표준 시나리오 활용 현황
 - 기상청 K-ACE와 기상청, 영국기상청의 컨소시움을 통해 생산한 UKESM GCM 자료를 SQM 상세화 입력자료로 사용
- 신청 시나리오 활용 현황
 - 진행 중인 농촌진흥청의 “기후변화에 따른 농경지 양분 유출 영향·취약성 평가(1단계)” 연구에 활용 함

□ 관련 논문 및 보고서 등

○ 상세화 자료 활용 관련 저서

No.	보고서/논문 제목	발주처/학회지	연구기간/ 발행연도	내용 설명
1	기술서 발간 : 농업환경생태분야 기후영향 취약성 평가 1주기 보고서 (ISBN 978-89-4806797-2 93520)	국립농업과학원	2020~2021 /2021.5.	한반도 CMIP6 다중 GCM 앙상블을 통한 생물계절 농경지 양분유출 기후변화 영향평가

○ SSP CMIP6 GCM 활용 대표논문

No.	논문 정보	구분 국내/SCI	내용 설명
2	Assessing the Hydroclimatic Movement under Future Scenarios Including both Climate and Land Use Changes	SCI	UKESM1 GCM과 토지이용 변화 시나리오를 사용하여 한강유역의 수문변동을 평가함
3	APEX-paddy 모델을 활용한 SSPs 시나리오에 따른 논 필요수량 변동 평가	국내	CMIP6 기반 상세화된 다중 GCM 앙상블을 통해 미래 논 필요수량의 변동을 평가함
4	SSPs 시나리오에 따른 미국쥐손이 적합 서식지 분포 예측	국내	전국 60개 ASOS 자료를 활용하여 CMIP6 상세화 자료를 생산하고 미국 쥐손이 미래 서식지 분포를 예측함
5	SSP 기후변화 시나리오에 따른 농업용 저수지 홍수조절능력 분석	국내	CMIP6 6개의 GCM을 사용하여 전국 18개 저수지의 홍수조절능력을 평가함
6	기후변화와 강우분포 및 CN에 따른 미래 홍수량 평가	국내	CMIP6 16개의 GCM을 사용하여 미래 기후변화에 따른 확률강우를 분석하고 CN값에 따른 미래 홍수량을 평가함
7	CMIP5 및 CMIP6 GCM 기반 무한천 유역 농경지 미래 침수 위험도 분석	국내	CMIP6 GCM 19종을 활용한 무한천유역 침수위험도 평가

○ 상세화 자료 생산 기법 관련 보고서 및 논문

- 상세화 기법 설명 논문

No.	논문 정보	구분 국내/SCI	내용 설명
8	Cho, J., G. Ko, K. Kim, and C. Oh. 2016. Climate change impacts on agricultural drought with consideration of uncertainty in CMIP5 scenarios. Irrigation and Drainage. DOI: 10.1002/ird.2035	SCIE	상세화 기법 간략한 소개 및 적용
9	조재필, 정임국, 조원일, 이은정, 강대인, 이준혁, 2018a. 기후변화 적응을 위한 사용자 중심의 기후서비스체계 제안 및 사용자인터페이스 플랫폼 개발. 한국기후변화학회지 9, 1-12.	비SCI	상세화 플랫폼 (rSQM 포함)
10	R 공식 패키지 ○ Quantile Mapping: https://cran.r-project.org/web/packages/qmap/index.html ○ rSQM: https://cran.r-project.org/web/packages/rSQM/index.html	기타	Quantile Mapping 알고리즘

기타사항

○ 없음